

RATARAKENTTEEN ROUTASUOJAUS

- o **Antti Nurmikolu**
- o **Pauli Kolisoja**

RATARAKENTTEEN ROUTASUOJAUS

- o Antti Nurmikolu
- o Pauli Kolisoja

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5100
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-064-x
ISSN 1455-2604

Nurmikolu, Antti – Kolisoja, Pauli: Ratarakenteen routasuojaus. Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. Helsinki 2002. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. 101 sivua ja liite. ISBN 952-445-064-x, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: ratarakenne, routamitoitus, roudan syvyys, routasuojaus, routalevy

TIIVISTELMÄ

Raportissa esitetään Ratahallintokeskuksen (RHK) julkaisussa ”Ratatekniset määräykset ja ohjeet” (RAMO) esitetyn ratarakenteen routamitoitusohjeen laadinnan taustat. Taustoihin kuuluu routamitoitusmenetelmiä ja mitoituksessa tarvittavia parametrejä koskeva kirjallisuusselvitys, kostuneen XPS-routalevyn lämmönjohtavuusmittaukset laboratoriossa sekä näiden selvitysten perusteella valituilla menetelmillä ja parametrien arvoilla tehdyt herkkyystarkastelulaskelmat. Työn tuloksena esitetään käytännölliseen ratarakenteen routamitoitukseen soveltuvat mitoituskäyrästöt, joista määritetään routimattomalta rakenteelta vaadittu paksuus eristämättömässä tai routalevyllä eristetyssä rakenteessa mitoittavan pakkasumman ja vuotuisen keskilämpötilan perusteella.

Raiteen suuren tasaisuusvaatimuksen vuoksi ratarakenteen routamitoituksen lähtökohtana on, että mitoittavana talvena roudan ei sallita tunkeutuvan routivaan maahan. Tästä syystä routamitoitus perustuu suurelta osin roudan syvyyden laskentaan. Työssä on tarkasteltu useita roudan syvyyden laskemiseksi esitettyjä menetelmiä. Tehtyihin tarkasteluihin perustuen routamitoituskäyrästöjen laadinnassa päädyttiin käyttämään Beskowin mallin mukaisella sulan maan jäähtymislämmön huomiooninnilla tarkennettua Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmää.

Kirjallisuusselvityksen perusteella valittuja parametrien arvoja käyttäen tehdyissä roudansyvyyslaskelmissa havaittiin laskentamenetelmän suurin herkkyys materiaali-parametrien osalta rakennemateriaalien lämmönjohtavuudelle. Tästä huolimatta materiaali-parametrien arvot vakioitiin odotettavissa oleviksi keskimääräisiksi arvoiksi mitoitusohjetta laadittaessa, koska parametrien arvoissa paikkakohtaisesti tapahtuvia muutoksia on käytännön mitoituksessa ja etenkin routasuojauksen toteutuksessa käytännössä kannattamatonta huomioida. Ilmastoparametrien osalta vuotuisen ilman keskilämpötilan todettiin laskelmissa vaikuttavan merkittävästi sulan maan lämpötila-gradientin kautta roudan syvyyteen. Siten rakennekerrosten paksuudet määräviin mitoituskäyrästöihin otettiin määrääväksi tekijäksi mitoittavan pakkasumman ohella vuotuinen ilman keskilämpötila, jolloin samoista käyrästöistä on mahdollista mitoittaa rakennekerrospaksuudet eri toistumistodennäköisyyden omaavilla pakkasmäärillä.

Nurmikolu, Antti – Kolisoja, Pauli: Frost Protection of the Track Structure. Finnish Rail Administration, Maintenance Department. Helsinki 2002. Publications of the Finnish Rail Administration A 1/2002. 101 pages and one enclosure. ISBN 952-445-064-x, ISSN 1455-2604.

Key words: track structure, frost dimensioning, frost depth, frost protection, frost insulation board

SUMMARY

The basis of new instructions for frost dimensioning presented by the Finnish Rail Administration is given in this report. The report includes a literature review concerning frost dimensioning methods and parameters needed in frost dimensioning, laboratory measurements of the thermal conductivity of wetted XPS-frost insulation boards and finally based on these, the frost depth calculations. The practically applicable frost dimensioning diagrams are presented as the result of the work. The required thickness of non-frost susceptible track structure in insulated and in non-insulated structures can be determined by using these curves.

Because of the high smoothness requirement of the rail, the basis of the frost dimensioning of track structure is that frost is not allowed to reach the frost susceptible subsoil during a dimensioning winter. Therefore, the frost dimensioning of track structures is very much based on calculation of frost depth. Several methods suggested for calculation of frost depth are considered in the study. In the final compilation of dimensioning curves the method presented by Watzinger, Kindem and Michelsen supplemented by the cooling heat of unfrozen soil calculated by the model of Beskow was decided to be used.

In the frost depth calculations, which were done using the parameter values selected based on the literature review, the sensitivity of the calculation method was found to be highest, with regard to the material parameters, for the thermal conductivity of structural material. Despite of this, the values of material parameters were chosen to be considered as constants, because it is unprofitable to take into account the locally occurring changes in these values in practical frost protection. Regarding the climate parameters the annual mean temperature was in the calculations observed to have an essential influence on the frost depth through the thermal gradient of unfrozen ground. Therefore the annual mean temperature was taken in the dimensioning diagrams as a determining parameter in addition to the frost sum. Thus it is possible to dimension the thickness of the structural layers using the same diagrams in connection with frost sums that have different statistical recurrence time.

ESIPUHE

Tämä ratarakenteen routamitoitusta käsittelevä tutkimus tehtiin Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa professori Pauli Kolisojan ohjauksessa. Tämän raportin laati diplomi-insinööri Antti Nurmikolu. Tutkimuksen tilaajana ja rahoittajana toimi Ratahallintokeskus (RHK).

Tutkimuksen etenemistä valvoi johtoryhmä, johon kuuluivat Pasi Leimi RHK:n kunnossapitoyksiköstä, Jouko Suomalainen ja Juha Heinonen Oy VR-Rata Ab:stä, Seppo Saarelainen VTT, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta sekä Pauli Kolisoja ja Antti Nurmikolu TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriosta.

Helsingissä, maaliskuussa 2002

Ratahallintokeskus
Kunnossapitoyksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ..... | 3 |
| SUMMARY | 4 |
| ESIPUHE..... | 5 |
| SISÄLLYSLUETTELO | 6 |
| 1. JOHDANTO | 8 |
| 2. RATARAKENTEEN ROUTASUOJAUKSEN MITOITUKSEN LÄHTÖKOHDAT | 9 |
| 2.1 Ratarakenteen routasuojauksen suunnittelun tavoite ja tarkkuus..... | 9 |
| 2.2 Lämmönsiirtyminen ratarakenteessa..... | 10 |
| 2.2.1 Horisontaalinen lämmönsiirtyminen | 10 |
| 2.2.2 Lämmönsiirtymismuodot..... | 11 |
| 2.2.3 Lämpötase maan jäätymisprosessissa..... | 13 |
| 3. ROUTASUOJAUKSEN MITOITUSMENETELMÄT | 15 |
| 3.1 Roudan syvyyden laskentaan perustuvat menetelmät..... | 15 |
| 3.1.1 Neumannin teoria ja Rucklin menetelmä | 15 |
| 3.1.2 Stefanin menetelmä | 15 |
| 3.1.3 Berggrenin menetelmä..... | 17 |
| 3.1.4 Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmä | 19 |
| 3.1.5 Beskowin menetelmä..... | 21 |
| 3.1.6 Watzingerin, Kindemin, Michelsenin menetelmän ja Beskowin menetelmän yhdistelmä | 23 |
| 3.1.7 Skaven-Haugin – Watzingerin menetelmä | 23 |
| 3.1.8 Roudan syvyyden laskentamenetelmät kerroksellisessa rakenteessa | 26 |
| 3.1.9 Kenttähavaintomallit | 30 |
| 3.1.10 Numeeriset roudan syvyyden laskentamenetelmät..... | 32 |
| 3.2 Routausun laskentaan perustuvat menetelmät | 33 |
| 3.2.1 Yleistä..... | 33 |
| 3.2.2 Segregaatiopotentiaaliteoria | 34 |
| 3.2.3 SSR-malli..... | 37 |
| 3.3 Mitoituskäyrästä ja ratarakenteen routamitoitukseen | 39 |
| 4. MITOITUKSEN LÄHTÖARVOISTA | 42 |
| 4.1 Yleistä | 42 |
| 4.2 Maaperän jäätymislämpö | 42 |
| 4.3 Pohjamaan ja rakennekerrosten lämpökapasiteetti | 43 |
| 4.4 Rakennemateriaalien lämmönjohtavuus | 45 |
| 4.4.1 Yleistä..... | 45 |
| 4.4.2 Maan lämmönjohtavuuden määrittämisestä | 46 |
| 4.4.3 Taulukoituja arvoja maamateriaalien lämmönjohtavuudelle..... | 47 |
| 4.4.4 XPS-routalevyn lämmönjohtavuus..... | 49 |
| 4.5 Lämpötilagradientti..... | 55 |
| 4.5.1 Lämpötilagradientti jäätyneessä rakenteessa..... | 55 |
| 4.5.2 Lämpötilagradientti routarajan alapuolella..... | 56 |
| 4.6 Rakennemateriaalien vesipitoisuus | 59 |
| 4.7 Rakennemateriaalien kuivatiheys..... | 61 |

| | |
|---|----|
| 4.8 Routivuuden arviointi | 61 |
| 4.9 Ilmastotekijät..... | 63 |
| 5. ROUTAMITOITUSLASKELMAT | 70 |
| 5.1 Lähtökohdat mitoituslaskelmille..... | 70 |
| 5.1.1 Laskelmien tavoite..... | 70 |
| 5.1.2 Laskelmiin valitut mitoitusmenetelmät | 70 |
| 5.1.3 Laskennan perustaksi parametreille arvioidut oletusarvot | 71 |
| 5.2 Laskentamenetelmien vertailu ja tulosten suhde nykyiseen mitoitusohjeeseen eri paikkakunnilla..... | 73 |
| 5.3 Laskentamenetelmien herkkyys eri parametreille..... | 76 |
| 5.3.1 Yleistä..... | 76 |
| 5.3.2 Herkkyys tukikerroksen materiaaliparametreille..... | 76 |
| 5.3.3 Herkkyys XPS-routalevyn lämmönjohtavuudelle | 77 |
| 5.3.4 Herkkyys alusrakenteen materiaaliparametreille..... | 78 |
| 5.3.5 Herkkyys sulan maan lämmönjohtavuudelle, lämpötilagradientille sekä vuotuiselle ilman keskilämpötilalle..... | 80 |
| 5.3.6 Herkkyys pakkaskauden kestolle..... | 81 |
| 5.3.7 Herkkyys talven lämpötila-amplitudille | 82 |
| 5.3.8 Herkkyys mitoittavan pakkassumman toistumistiheydelle | 83 |
| 5.4 Uuden routasuojauksen mitoitusohjeen laadinta..... | 84 |
| 5.4.1 Mitoitusohjeen laadinnan lähtökohdat..... | 84 |
| 5.4.2 Ratarakenteen uusi routamitoitusohje | 85 |
| 5.4.3 Esimerkki routamitoituksesta | 91 |
| 5.4.4 Uuden mitoituskäyrästön vertailu muihin ratarakenteen routamitoituskäyrästäihin | 92 |
| 6. YHTEENVETO..... | 95 |
| LÄHDELUETTELO | 98 |
| LIITE | |
| XPS-routalevyjen pitkäkestoiset sykliset kuormituskokeet | |

1. JOHDANTO

Raiteen tasaisuus on rautatien liikenteenvälityskyvyn perusedellytys, johon pääsemiseksi ratarakenteessa muodostuva routanousu tulee olla hallinnassa. Routanousuja hallitaan rakennekerrosten mittojen ja materiaalien valinnalla. Tässä selvityksessä on tarkasteltu routamitoitusta erityisesti ratarakenteessa.

Rautatieympäristössä routimisen aiheuttamat vaikutukset ovat erityisen haitallisia, sillä vaatimus raiteen tasaisuudelle liikenteen välittämiseksi on varsin suuri verrattuna esimerkiksi tierakenteeseen. Tierakenteessa routimisilmiöstä aiheutuva suurin haitta on yleensä ns. sulamispehmeneminen, mutta rautateillä merkittävin haitta sen sijaan aiheutuu epätasaisesta routanoususta. Käytännössä raiteen suuren tasaisuusvaatimuksen takia ratarakenteelta vaaditaan määrätyissä mitoitusolosuhteissa routimattomuutta, jolloin routimisen todennäköisyys on yhtä suuri kuin mitoitusolosuhteiden toteutumisen todennäköisyys.

Ratarakenteen routimattomuuden merkityksen havainnollistamiseksi voidaan todeta, että yksittäisen routimisen aiheuttaman "routapatin" seurauksena rataosalle joudutaan kyseiselle kohdalle asettamaan nopeusrajoitus, minkä johdosta rautatien liikenteenvälityskyky ja palvelutaso luonnollisesti alenevat. Toisaalta routivien paikkojen korjaustyöt vaativat laajoja resursseja, sillä kyseeseen tulee käytännössä massanvaihto tai lisäeristys, jolloin etenkin vilkkaasti liikennöidyillä yksiraiteisilla rataosuuksilla raidevarausaikojen saanti tuottaa hankaluuksia ja rajoittaa liikenteen välittämistä edelleen.

Nyt käsiteltävä projekti on jatkoa Ratahallintokeskuksen (RHK) toimeksiannosta Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa tehdylle suulakepuristettuja XPS-routalevyjä koskevalle selvitykselle, jonka tuloksia on esitelty RHK:n julkaisusarjan raportissa "XPS-routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot". Kyseisessä selvityksessä havaittiin mm. XPS-routalevyjen muuttuneiden lämmönjohto-ominaisuuksien myötä tarve ratarakenteen routasuojauksen mitoitusmenettelyn tarkistamiselle, johon on perehdytty tässä selvityksessä.

Työn sisältö on kaksijakoinen. Luvuissa 2, 3 ja 4 käsitellään kirjallisuusselvityksen perusteella radan routasuojauksen mitoituksen lähtökohtia, routamitoitusmenetelmiä sekä mitoituksessa tarvittavien parametrien arvoja ja määrittämismenetelmiä. Luvussa 4 on lisäksi esitetty laboratoriossa tehty tutkimusosa, joka koskee XPS-routalevyn kosteuspitoisuuden vaikutusta levyn lämmönjohtavuuteen. Luvussa 5 on esitetty kirjallisuuteen pohjautuvan osion perusteella valituilla mitoitusmenetelmillä ja parametrien arvoilla tehtyjä routansyvyyslaskelmia ja laskelmien herkkyyttä eri parametreille. Luvun päätteeksi on esitetty työn tuloksena laaditut uudet käytännölliseen ratarakenteen routamitoitukseen soveltuvat mitoituskäyrästöt.

2. RATARAKENTEEN ROUTASUOJAUKSEN MITOITUKSEN LÄHTÖKOHDAT

2.1 Ratarakenteen routasuojauksen suunnittelun tavoite ja tarkkuus

Routasuojauksen suunnittelun tavoitteena on yleisesti ottaen varmistaa, että routanoususta aiheutuva maarakenteen tai sen päällisen rakenteen vaurioitumisen todennäköisyys sekä maarakenteen pinnan epätasaisuuden suuruus ja toistuvuus ovat hallinnassa. Ratarakenteessa erityisesti routasuojauksen suunnittelun tavoitteena voidaan pitää routanoususta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden suuruuden ja toistuvuuden hallintaa.

Epätasaisuuden *suuruuden* hallinnalla tarkoitetaan radan rakennekerrosten materiaalien valintaa ja kerrospaksuuksien mitoittamista sellaisiksi, että rakenteen routanoususta aiheutuva raiteen epätasaisuuden suuruus ei tietyllä todennäköisyydellä ylitä rataosuuden kunnossapitotasosta riippuvaa vaatimustasoa.

Epätasaisuuden *toistuvuuden* hallinnalla ymmärretään mitoittavan talven ankaruuden (pakkasmäärän) valitsemista sellaiseksi, että mitoittustalven tilastollinen toistumistiheys vastaa em. ”tiettyä todennäköisyyttä”. Suomessa ratarakenteen routamitoituksessa mitoittavana pakkasmääränä on käytetty tärkeimmillä rataosilla tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvaa ilman pakkasmäärää (vrt. taulukko 4.11) (Ratahallintokeskus 1999b).

Routasuojauksen mitoitusmenetelmät voidaan jakaa roudan syvyyden ja routanousun laskentaan perustuviin menetelmiin.

Roudan syvyyden laskentaan perustuvissa mitoitusmenetelmissä radan routimattomat rakennekerrokset pyritään mitoittamaan sellaisiksi, että roudan tunkeutuminen routivaan maahan on mitoittustalvena kokonaan estetty. Tällöin routimisen aiheuttamaa routanousua ei periaatteessa esiinny lainkaan lukuun ottamatta erityistapauksia, joissa routimattomassa maassa routarajalle suuntautuu esimerkiksi pohjaveden virtaus. Routimattomassakin rakenteessa saattaa kuitenkin muodostua jonkin asteista routanousua rakennekerrosmateriaalien huokosveden jäätyminen yhteydessä tapahtuvan tilavuuden kasvun myötä, mikäli materiaali on täysin veden kyllästämä. Roudan syvyyden laskentaan perustuvien routamitoitusmenetelmien käytön lähtökohtana on, että routimista (jäälinsien muodostumista) ei sallita lainkaan tapahtuvaksi.

Routanousun laskentaan perustuvia mitoitusmenetelmiä käytetään silloin, kun lähtökohtaisesti mitoittustalvena sallitaan tietyn suuruisen routanousun muodostuminen. Roudan tunkeutuminen routivaan maahan sallitaan siten tietyltä paksuudelta, joka määräytyy sallitun routanousun suuruuden ja routivan maan routivuuden perusteella.

Raideliikennöinnin sujuvuuden kannalta raiteen tasaisuusvaatimus on varsin suuri, mistä johtuen sallitut routanousut ovat vähäisiä. Tämän vuoksi ratarakenteen routasuojaussuunnittelussa on edellä asetettujen tavoitteiden täyttämiseksi perinteisesti lähdetty siitä, että ratarakenne mitoitetaan mitoittustalvena routimattomaksi, eli roudan tunkeutumista routivaan maahan ei mitoittustalvena sallita. Periaatetta puoltaa myös se, että mitoitusoptimiin pyrkimisellä radan rakennekustannuksissa saavutettava hyöty on

vähäinen verrattuna mahdollisista routahaitoista aiheutuviin rataosan liikennöinti-nopeuden rajoittamisiin, viivytyksiin ja kunnossapitokustannuksiin. Lisäksi on huomattava, että routimishaitan korjaaminen jälkikäteen lisäeristyksellä tai massanvaihdolla on rautatieympäristössä erityisen ongelmallista, koska jatkuvan liikennöinnin johdosta riittävän pitkän yhtäjaksoisen työajan saaminen aiheuttaa useilla rataosuuksilla ongelmia.

Näin ollen ratarakenteen routasuojauksen mitoituksessa on perusteltua käyttää roudan syvyyden laskemiseen perustuvaa mitoitusmenetelmää. Laskentamenetelmiä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.

Routasuojaus on mahdollista toteuttaa kahdella tavalla. Routimatonta maamateriaalia käytettäessä saatetaan mitoituksessa ainakin ankarimmissa olosuhteissa päätyä varsin suureen eristyskerrospaksuuteen, jolloin materiaalienekki ja siten siitä koituvat kustannukset ovat huomattavat. Toinen mahdollisuus on korvata osa routimattomasta maamateriaalista routaeristeellä, jona käytetään alhaisen lämmönjohtokyvyn omaavaa XPS-routalevyä. Routaeristetyssä rakenteessa saavutetaan eristämättömtä rakennetta vastaava routasuojaus huomattavasti alhaisemmalla kokonaisrakennepaksuudella ja saavutetaan mahdollisesti tuntuvia kustannussäästöjä.

Routasuojauksen mitoituslaskelmien luotettavuus riippuu suurelta osin siitä, kuinka hyvin laskelmien lähtöarvoiksi vaaditut vallitsevat ilmasto-olosuhdeparametrit sekä tarkastellun rakenteen materiaali-parametrit pystytään määrittelemään (Johansen 1982). Mitoituksen lähtöarvoihin paneudutaan kappaleessa 4.

2.2 Lämmönsiirtyminen ratarakenteessa

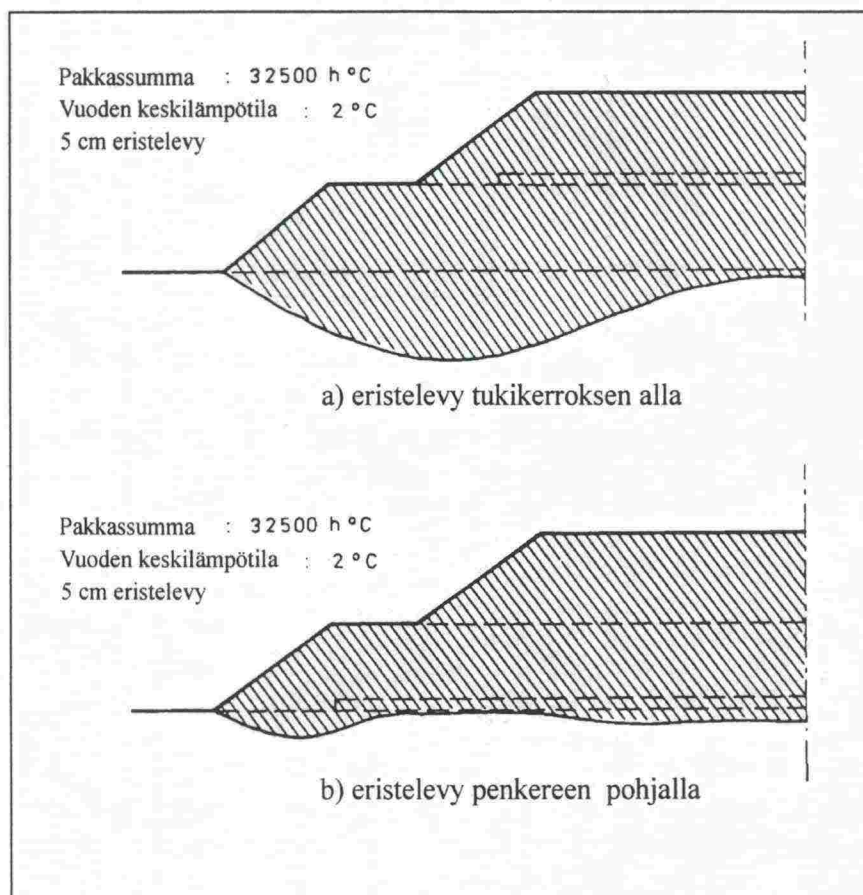
2.2.1 Horisontaalinen lämmönsiirtyminen

Koska ratarakenteen leveys on suhteellisen pieni, vaakasuuntaisella lämmönsiirtymisellä saattaa routamitoituksen kannalta olla merkitystä etenkin korkeiden rata-penkereiden kohdalla. Kaksiulotteisten routalaskelmien mukaan (Johansen 1982) roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan on mahdollista joissakin tapauksissa, etenkin penkereissä, jos routimattomien rakennekerrosten paksuus on mitoitettu tavan-omaiseen tapaan yksiulotteisesti (kuva 2.1).

Tällaista roudan vaakasuuntaista tunkeutumista on epäilty ratarakenteen routimisen syyksi joissakin tapauksissa myös Suomessa silloin, kun routaeristetty rakenne on routinut, vaikka routasuojaus on todettu suunnitelman mukaisesti tehdyksi. Kuvan 2.1 perusteella voidaan roudan vaakasuuntaisen tunkeutumisen todeta vaikuttavan routivan penkereen osan jäätymiseen routaeristetyssä penkereessä jo varsin alhaisella penger-koikeudella verrattuna eristämättömään rakenteeseen, jossa routimattoman maa-aineksen kerrospaksuus on suurempi. Mikäli routalevyä käytetään, se olisi tehokkaampaa sijoittaa penkereessä syvemmälle rakenteeseen ja ulottaa normaali-tilannetta leveämmälle kuvan 2.1 mukaisesti.

On huomattava, että kaksiulotteisissa ratapenkereen routaantumistarkasteluissa merkittävä tekijä on penkereen luiskissa ja jätkänpolulla olevan lumikerroksen paksuus. Roudan tunkeutumista kaksiulotteisesti on mahdollista tarkastella numeerisesti

esimerkiksi elementtimenetelmällä (ks. kappale 3.1.10). Tässä selvityksessä pitäydytään yksiulotteisissa roudan tunkeutumistarkasteluissa.

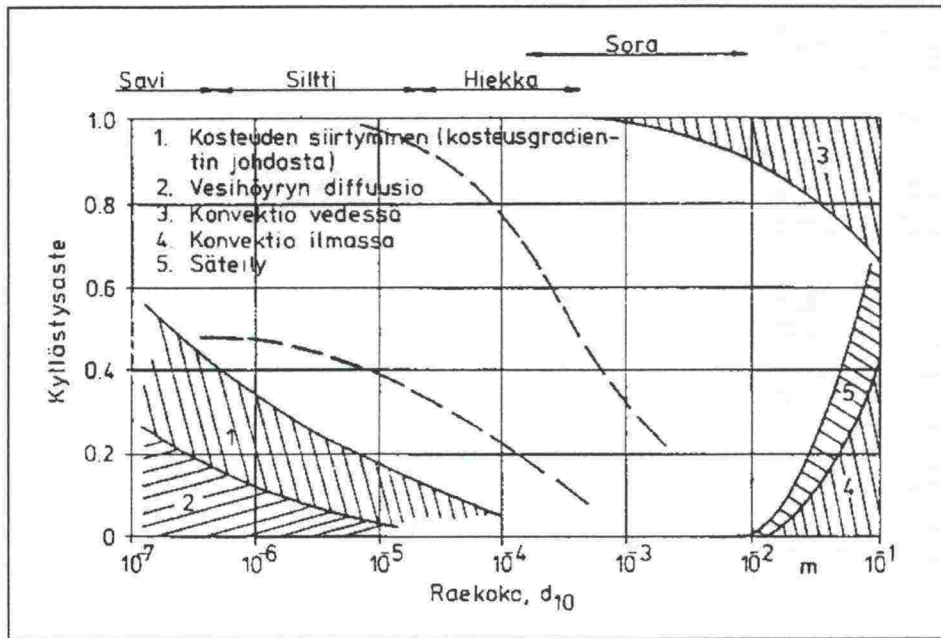


Kuva 2.1. a) Kaksiulotteinen roudan syvyyden mallinnus penkereessä, jossa routalevy sijaitsee tukikerroksen alla. Viivoitettu alue kuvaa mallinnettua suurinta roudan tunkeutumisaluetta. Alin katkoviiva vastaa pelkästään pystysuuntaisella routamallilla saatua roudan syvyyttä. b) Routalevy alusrakenteen pohjalla. Kuvan laskelmissa oletuksena on ollut, että jätkänpolku penkereessä on lumeton ja lumikerros kasvaa tästä saavuttaen penkereen alareunassa alueen luonnollisen lumenpaksuuden. (Johansen 1982)

2.2.2 Lämmönsiirtymismuodot

Lämmön siirtyminen maaperässä on lämpötilaerojen tasoittumispyrkimyksen johdosta tapahtuvaa energian siirtymistä. Lämmön siirtymisestä maaperässä pääosa tapahtuu johtumalla, jonka lisäksi joissakin tapauksissa konvektiivisesti tai lämpösäteilynä. Kuvassa 2.2 on esitetty kyllästysasteen ja raekoon suhteen alueet, joilla johtumisen lisäksi muilla lämmönsiirtymismuodoilla on merkitystä.

Jos maaperä routii (ts. routarajalle virtaa vettä), lämmön siirtymistä tapahtuu myös konvektiivisesti veden mukana kulkeutumalla. Kujala (1994) toteaa, että Taylorin ja Luthinin mukaan konvektiivisesti veden mukana siirtyvän lämmön osuus routimisilmiössä on kuitenkin vain 1/1000 lämmönjohtumisesta. Näin ollen routimisilmiössä veden mukana kulkeutumalla tapahtuva konvektiivinen lämmön siirtyminen voidaan routaantumistarkasteluissa jättää huomioimatta. Sen sijaan routimisessa routarajalle virtaavan veden jäätyminen yhteydessä vapautuva olomuodonmuutoslämpö muodostaa routivassa maaperässä huomioonotettavan tekijän.



Kuva 2.2. Raekoon (d_{10}) ja kyllästysasteen suhteen määritettyjä alueita, joilla johtumisen lisäksi muilla lämmönsiirtymismuodoilla on merkitystä. Katkoviivat kuvaavat luonnollisten maalajien aluetta. (Johansen 1975)

Suhteellisen kuivassa louheessa voidaan kuvan 2.2 perusteella huokosilmassa tapahtuva konvektio todeta mahdolliseksi lämmönsiirtymismekanismiksi. Konvektiivisen huokosilmassa tapahtuvan lämmönsiirtymisen havaittiin selittävän joidenkin Norjassa 1990-luvulla rakennettujen ratojen routimisongelmia. Ongelmalliseksi todettiin Norjassa tuolloin ratarakennemateriaalina käytetty sprengstein-nimellä kutsuttu louhe. Niillä osuuksilla, joilla sprengsteinia oli käytetty, routimisen todettiin myöhemmin olevan seurausta siitä, että sprengsteinissa lämmön siirtymistä tapahtuu huomattavassa määrin konvektiona huokosilmassa, mitä ei rakenteen mitoituksessa käytetyssä lämmönjohtavuusarvossa oltu otettu huomioon (ks. kappale 4.4.1) (Jernbaneverket 1999).

Johtumalla tapahtuvaa lämmön siirtymistä kuvataan Fourierin lailla. Sen mukaan lämpövirta alenevan lämpötilan suuntaan on kaavan 2-1 mukaisesti suoraan verrannollinen vallitsevaan lämpötilagradienttiin, missä verrannollisuuskertoimen on materiaalin lämmönjohtavuus. Jos lämmön siirtymistä maaperässä kokonaisuudessaan kuvataan johtumismallilla, tulisi tällöin tarkkaan ottaen lämmönjohtavuuden sijaan puhua näennäisestä lämmönjohtavuudesta (Saarelainen 1990).

$$q = \lambda \cdot \frac{dT}{dz} \quad , \text{ jossa} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} q &= \text{lämpövirta alenevan lämpötilan suuntaan, } W/m^2 \\ \lambda &= \text{lämmönjohtavuus lämpövirran suunnassa, } W/Km \\ dT/dz &= \text{lämpötilagradientti lämpövirran suunnassa, } K/m \end{aligned}$$

2.2.3 Lämpötase maan jäätymisprosessissa

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön eli energian häviämättömyyden lain nojalla energiaa ei voida luoda tyhjästä eikä hävittää. Tämä voidaan esittää energiataseyhtälönä seuraavasti (Kujala 1994):

$$E_{out} = E_{in} + E_g - E_{st} \quad , \text{ jossa} \quad (2-2)$$

- E_{out} = tasealueelta ulos tuleva energia
- E_{in} = tasealueelle sisään menevä energia
- E_g = tasealueen sisällä vapautuva energia
- E_{st} = tasealueen sisään varastoituva energia

Maan jäätymisprosessissa tasealueelta poistuu suurempi energiamäärä kuin sinne menee sisään, koska tasealueen sisällä vapautuu energiaa (E_g) maan ja sen sisältämän veden jäähtymisen ja jäätyksen seurauksena. Sulamisprosessissa tilanne on päinvastainen johtuen tasealueen sisään varastoituvasta energiasta (E_{st}). Tällainen tila, jossa energiatila tasealueen sisällä muuttuu tarkasteluaikana, on epästationääri eli muuttuva.

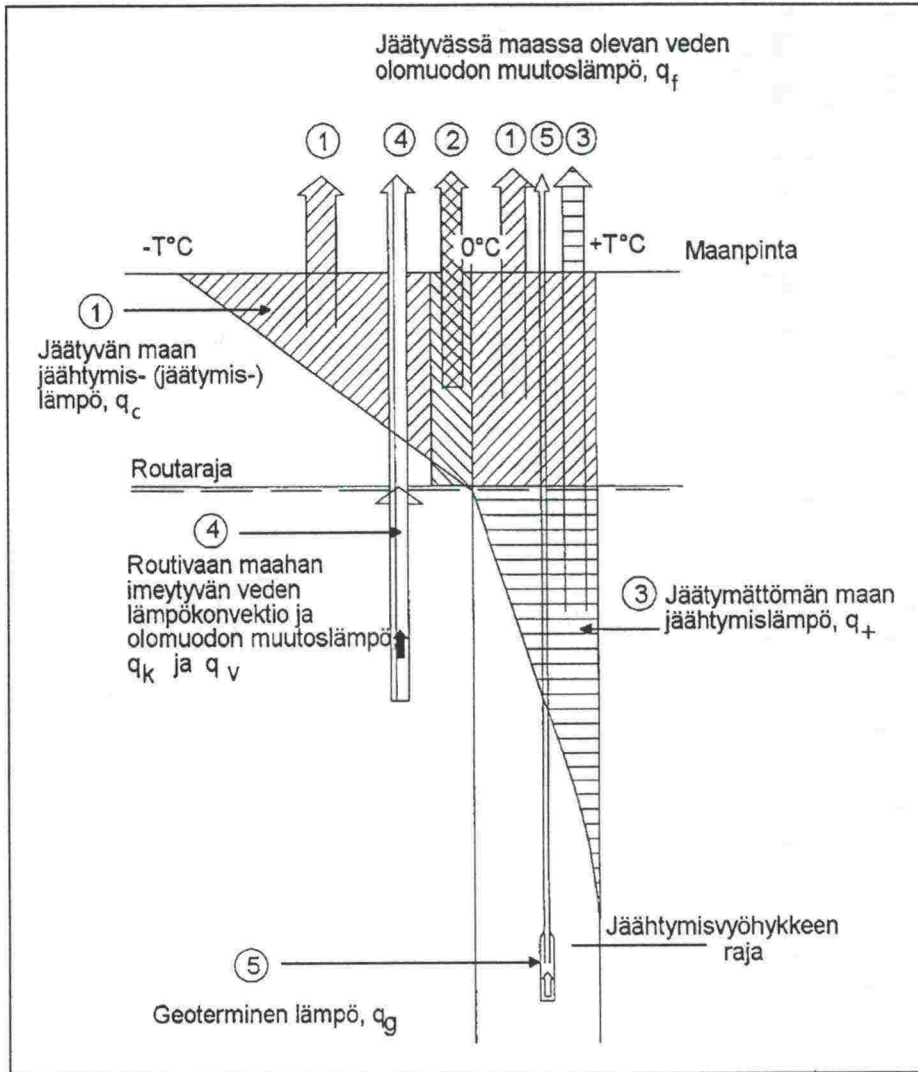
Yksiulotteisessa tapauksessa maan jäätymisprosessille voidaan esittää seuraava lämpötaseyhtälö (vrt. kuva 2.3):

$$Q_- = Q_+ + Q_v + Q_g + Q_f + Q_c \quad , \text{ Wh/m}^2 \quad , \text{ jossa} \quad (2-3)$$

- Q_- = tasealueelta (ylöspäin) poistuva lämpö,
- Q_+ = tasealueelle virtaava jäätyttömän maan jäähtymislämpö
- Q_v = routivaan maahan imeytyvän veden jäähtymislämpö
- Q_g = tasealueelle virtaava geoterminen lämpö
- Q_f = tasealueella vapautuva jäätyvän maan ja sen sisältämän veden jäähtymislämpö
- Q_c = tasealueella vapautuva jäätyvän maan ja sen sisältämän veden jäähtymislämpö

Yhtälössä 2-3 tasealueena on pidetty koko routaantuvaa maakerrosta, mutta vastaava tarkastelu voidaan tehdä esimerkiksi differentiaalisen ohuelle kerrokselle routarajalla. Tasealueen sisään tulevaa energiaa (E_{in}) yhtälössä 2-3 edustaa routarajalle virtaava sulana säilyvän maan jäähtymislämpö (Q_+), routivaan maahan imeytyvän veden jäähtymislämpö (Q_v) sekä geoterminen lämpö (Q_g). Vastaavasti tasealueen sisällä vapautuvaa energiaa (E_g) edustaa jäätyvän maan sekä sen sisältämän veden jäähtymislämpö (Q_f) ja jäähtymislämpö (Q_c). Yhtälöstä on jätetty aiemmin esitettyjen perustelujen nojalla huomioimatta routivaan maahan imeytyvän veden mukana sekä huokosilmassa tapahtuva lämpökonvektio. Kuvassa 2.3 havainnollistetaan jäätymisprosessin aikana maasta poistuvan lämpömäärän jakautumista osakomponentteihin.

Yhtälöä 2-2 voidaan pitää jäätymisprosessin tarkastelun perustana, jota kappaleessa 3 esitettävillä laskentamenetelmillä pyritään mallintamaan.



Kuva 2.3. Jäätymisprosessin aikana maasta poistuvan lämpömäärän jakaminen osakomponentteihin (Ehrola 1996).

3. ROUTASUOJAUKSEN MITOITUSMENETELMÄT

3.1 Roudan syvyyden laskentaan perustuvat menetelmät

3.1.1 Neumannin teoria ja Rucklin menetelmä

Neumann on käsitellyt roudan tunkeutumista matemaattisesti ”eksaktisti” pyrkien löytämään teoreettiselle roudan syvyyden laskentamallille ”tarkan” ratkaisun. Neumannin teoriassa maata käsitellään isotrooppisena, kosteana puoliavaruutena, jonka lämpötila on alun perin positiivinen vakio laskien hetkellä $t=0$ yhtäkkisesti pakkaslämpötilaan pysyen tämän jälkeen tarkasteluajan vakiona. Neumannin teorian ratkaisu perustuu Gaussin virheintegraalin muotoiseen syvyyden suhteen kuvattuun lämpötilajakaumaan, tautokroniin. Ratkaisua haettaessa päädytään varsin monimutkaisten laskelmien jälkeen transkendenttisen yhtälön graafiseen ratkaisemiseen, minkä johdosta teorian mukaisen tarkan ratkaisun hakeminen ei käytännön sovellutuksissa yleensä ole tarkoituksenmukaista. Kappaleessa 3.1.3 esitettävä Berggrenin menetelmä perustuu Neumannin esittämään ratkaisuun (Kujala 1994). Neumannin teoriaa ei tässä yhteydessä käsitellä sen heikon käytäntöön sovellettavuuden takia tarkemmin. Teoriaa on esitellyt Ehrola (1974a).

Ruckli on kehittänyt Neumannin teoriaa yksinkertaisemman laskentamenetelmän, jossa matemaattisesti työläästi ratkaistava Gaussin virheintegraalin muotoinen tautokroni on korvattu jäätyneessä kerroksessa suoralla (ts. lämpötilan oletetaan kasvavan tasaisesti syvyyden suhteen) ja jäähtymisvyöhykkeessä paraabelilla. Roudan syvyyden ratkaisu-yhtälössä edellytetään ns. suhteellisuustekijän tuntemista. Ehrola (1974a) toteaa Rucklin menetelmän soveltuvan melko hyvin roudan syvyyden määrittämiseen, mutta menetelmä on muissa tarkastelluissa lähteissä mainitsematon. Myöskään Ehrola ei ole esittänyt Rucklin menetelmän mukaista ratkaisua kerroksellisessa rakenteessa, mistä syystä myös tämä menetelmä jätetään tässä yhteydessä tarkemmin tarkastelematta. Menetelmää on kuvattu lähteessä (Ehrola 1974a).

3.1.2 Stefanin menetelmä

Stefanin laskentamalli (Stefan 1890) on alun perin kehitetty vesistöjen jään paksuuden arviointiin. Malli on kuitenkin perusteiltaan soveltuva myös roudan syvyyden arviointiin ja sen voidaan todeta muodostaneen roudan syvyyden laskentamallien perustan, jota on kehitetty seuraavissa kappaleissa esitetyillä parannuksilla.

Stefanin menetelmässä oletetaan maanpinnan lämpötilan laskevan yhtäkkiä pakkas-kauden keskimääräiseen lämpötilaan pysyen tämän jälkeen vakiona. Lisäksi oletetaan, että maan lämpötila kasvaa maanpinnan lämpötilasta lineaarisesti routarajalle asti, jonka alapuolella lämpötila oletetaan vakioksi.

Maasta routaantumisen aikana poistuvan lämpömäärän osakomponenteista (ks. yhtälö 2-3) Stefanin menetelmässä huomioidaan ainoastaan jäätyvän maaperän jäätyislämpö (Q_f). Maasta routaantuneen kerroksen läpi poistuva lämpö (Q_r) lasketaan noudattaen Fourierin lakia, jonka mukaan lämpövirta alenevan lämpötilan suuntaan (maanpinnalle) on suoraan verrannollinen lämpötilagradienttiin, joka oletetaan vakioksi. Verrannolli-

suuskerroin on maaperän lämmönjohtavuus. Kun huomioidaan esitetyt oletukset, Stefanin mallin mukaiseksi lämpötaseyhtälöksi saadaan:

$$dQ_- = dQ_f \quad , Wh/m^2 \quad (3-1)$$

$$\lambda_f \cdot G_- \cdot dt = q_f \cdot dz \quad , jossa \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} dQ_- &= \text{tasealueelta poistuva lämpö, } Wh/m^2 \\ dQ_f &= \text{tasealueella vapautuva maaperän jäätymislämpö, } Wh/m^2 \\ \lambda_f &= \text{jäätyneen maan lämmönjohtavuus, } W/mK \\ G_- &= \text{lämpötilagradientti routaantuneessa maassa, } ^\circ C/m \\ t &= \text{aika, } h \\ q_f &= \text{maaperän jäätymislämpö, } Wh/m^3 \\ dz &= \text{lisäys roudan syvyydessä ajassa } dt, m \end{aligned}$$

Stefanin mallissa maaperän jäätymislämpö lasketaan kaavalla 3-3 ja lämpötilagradientti jäätyneessä maassa esitettyjen oletusten mukaisesti kaavalla 3-4.

$$q_f = w \cdot \rho_d \cdot L_w \quad , jossa \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned} w &= \text{maan kosteuspitoisuus paino-osina} \\ \rho_d &= \text{maan kuivatiheys, } kg/m^3 \\ L_w &= \text{veden jäätymislämpö, } \approx 93 Wh/kg \end{aligned}$$

$$G_- = \frac{T_f}{z} \quad , jossa \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned} G_- &= \text{lämpötilagradientti routaantuneessa maassa, } ^\circ C/m \\ T_f &= \text{lämpötila maan pinnassa (oletus = pakkaskauden keskilämpötila), } ^\circ C \\ z &= \text{vallitseva roudan syvyys, } m \end{aligned}$$

Integroimalla yhtälö 3-2 käsittämään koko pakkasajan saadaan roudan maksimisyvyydelle yhtälö 3-5. Ratkaisu esitetään usein ns. Stefanin yhtälönä 3-6, jolloin routaantumiskertoimen (k) voidaan käyttää myös kenttämittauksin määritettyjä arvoja (ks. kappale 3.1.9).

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F}{q_f}} \quad , tai \quad (3-5)$$

$$z_f = k \cdot \sqrt{F} \quad , jossa \quad (3-6)$$

$$k = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f}{q_f}} \quad (3-7)$$

$$z_f = \text{suurin roudan syvyys, } m$$

$$k = \text{routaantumiskerroin, } m/(Kh)^{1/2}$$

$$F = \text{pakkasmäärä, } Kh$$

Stefanin mallissa jää näin ollen huomioimatta routarajalle virtaava sulana pysyvän maan jäähtymislämpö, jäätyvän maan jäähtymislämpö, routivaan maahan imeytyvän veden jäätyislämpö sekä geoterminen lämpö (vrt. kuva 2.3). Tästä syystä Stefanin mallin mukaisesti laskettuna roudan syvyydelle saadaan yleensä todellista suurempi arvo. Stefanin menetelmän tarkkuus paranee kosteassa maaperässä, missä veden jäätyislämpö muodostaa huomattavan osan jäätymisprosessin aikana vapautuvasta kokonaislämpömäärästä.

3.1.3 Berggrenin menetelmä

Berggrenin menetelmä on yleisesti käytetty roudan syvyyden laskentamenetelmä Pohjois-Amerikassa (Saarelainen 1993). Berggrenin menetelmä perustuu Neumannin esittämään ratkaisuun. Menetelmässä oletetaan maaperän alkulämpötilan olevan vakio kaikkialla ja maan pinnan lämpötilan laskevan yhtäkkisesti jäätymispisteen alapuoliseen lämpötilaan. Lisäksi mitoittavana pakkasmääränä tarkastellaan pakkasmäärää maan pinnassa. Tällöin kuvassa 3.1 esitettyjen yhtälöiden likimääräisratkaisuna roudan syvyyden laskemiseksi saadaan (Kujala 1994, Phukan 1989):

$$z_f = \psi \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_a \cdot n \cdot F}{q_f}}, \text{ jossa} \quad (3-8)$$

- ψ = dimensioton korjauskerroin, jonka suuruus määritetään kuvasta 3.2
 λ_a = sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuuksien keskiarvo, W/mK
 n = maan pinnan pakkasmäärän ja ilman pakkasmäärän suhdetta kuvaava kerroin
 F = pakkasmäärä ilmassa, Kh

Kuten yhtälöistä 3-5 ja 3-8 nähdään, Berggrenin menetelmä tarkentaa Stefanin menetelmää korjauskertoimen (ψ) avulla. Korjauskertoimella huomioidaan maan tilavuuslämpökapasiteetti eli jäätyvän maan jäähtymislämpö (Q_c) maasta routaantumisen aikana poistuvan lämpömäärän osakomponenttina. Siten korjauskerroin on aina pienempi kuin yksi, joten Berggrenin menetelmällä laskettu roudan syvyys on aina pienempi ja näin ollen yleensä tarkempi kuin Stefanin yhtälöllä laskettu roudan syvyys. Korjauskerroin (ψ) määritetään kuvasta 3.2 lämpösuhteen (α) ja parametrin (μ) avulla, jotka määritetään seuraavasti:

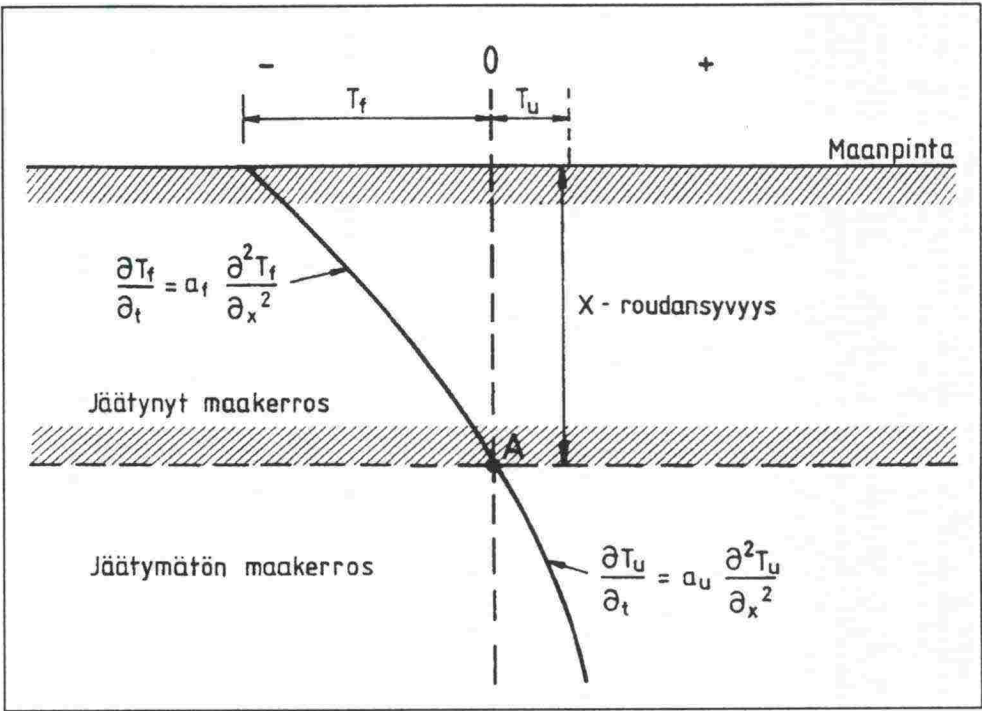
$$\alpha = T_u / T_f \quad (3-9)$$

$$\mu = CT_f / q_f, \text{ joissa} \quad (3-10)$$

- α = lämpösuhte, -
 T_u = alueen vuotuinen keskilämpötila, $^{\circ}C$
 T_f = pakkaskauden keskilämpötila maanpinnassa, $^{\circ}C$
 μ = parametri, -
 C = sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetin keskiarvo, Wh/m^3K

q_f = maan jäätyislämpö, Wh/m^3

Kuvasta 3.2 ja kaavasta (3-10) voidaan korjauskertoimen todeta lähestyvän arvoa 1 jäätyislämmön (q_f) suurentuessa, koska tällöin jäätyvän maan jäätyislämmön osuus pienenee suhteessa jäätyislämpöön ja Berggrenin menetelmän ratkaisu lähenee Stefanin menetelmän ratkaisua (vrt. kappale 3.1.2).

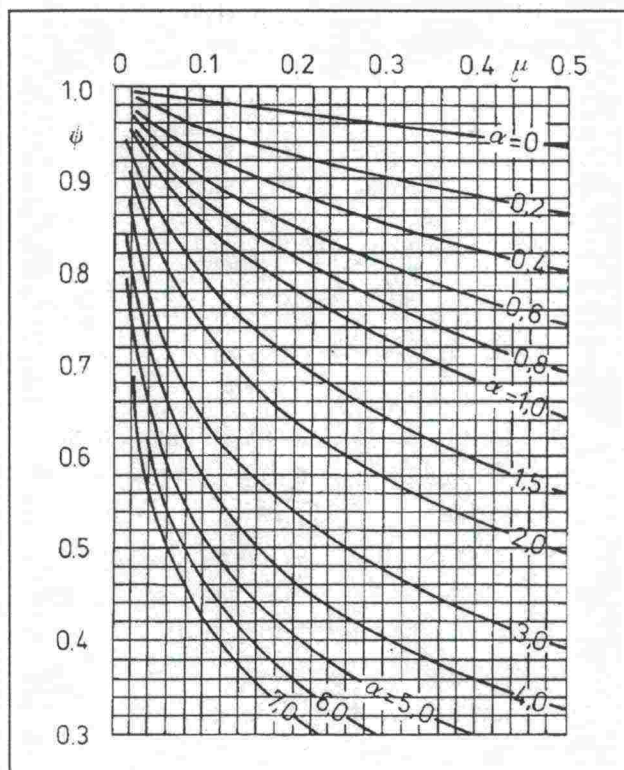


Kuva 3.1. Roudan syvyyden laskeminen Berggrenin menetelmällä. T_f on pakkas-
kauden keskilämpötila ja T_u alueen vuotuinen keskilämpötila (Kujala 1994).

Taulukossa 3.1 on esitetty Berggrenin menetelmällä lasketun ja mitatun roudan syvyyden arvoja eri tutkimuskohteissa (Hentilä et al. 1994). Tuloksista voidaan todeta Berggrenin menetelmällä laskettuna roudan syvyydelle saadun pääsääntöisesti jonkin verran liian pieniä arvoja. Tämä on hieman hämmentävää, koska Berggrenin menetelmässä ei huomioida sulana säilyvästä maasta routaantuvaan maahan virtaavaa lämpöä, eikä myöskään routivaan maahan imeytyvän veden jäätyislämpöä, minkä vuoksi menetelmällä voitaisiin olettaa saatavan todellista suurempi arvo roudan syvyydelle. Syynä lasketun roudan syvyyden pienuuteen saattavat olla epätarkat lähtöarvot.

Taulukko 3.1. Eri tutkimuskohteissa Berggrenin menetelmällä (yhtälö 3-8) laskettu ja mitattu roudan syvyys [m] (Hentilä et al. 1994).

| Kohde | Kontula | Nummi – Pusula | Jyväskylä | Oulunsuu | Kempele – Oulunsalo |
|-----------------------------|---------|-------------------|-----------|----------|------------------------|
| Yhtälöllä (3-8) laskettu | 0,69 | 0,93 | 1,34 | 1,60 | 1,35 |
| Mitattu | 0,81 | 1,2 | 1,3 | 1,63 | 1,6 |



Kuva 3.2. Maan tilavuuslämpökapasiteetin huomioon ottavan korjauskertoimen (ψ) määrittäminen Berggrenin menetelmässä parametrien (α) ja (μ) avulla (Kujala 1994).

3.1.4 Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmä

Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin (myöh. Watzingerin) menetelmä (Watzinger et al. 1965) on kehitetty Stefanin menetelmästä. Menetelmien lähtöolettamukset vastaavat toisiaan; maan lämpötila oletetaan pakkaskauden alkaessa vuotuista ilman keskilämpötilaa vastaavaksi vakioksi kaikkialla, maan pinnan lämpötilan oletetaan laskevan pakkaskauden alkaessa nopeasti pakkaskauden keskimääräiseen lämpötilaan ja lämpötilan oletetaan kasvavan lineaarisesti maan pinnalta routarajalle, jonka jälkeen lämpötila oletetaan em. vakioksi.

Watzingerin Stefanin menetelmään tuoma lisäys on maan tilavuuslämpökapasiteetin eli jäätyvän maan jäähtymislämmön (Q_c) huomiointi maasta routaantumisen aikana poistuvan lämpömäärän osakomponenttina. Näiltä osin Watzingerin menetelmä on periaatteeltaan Berggrenin menetelmää vastaava. Watzingerin mallin mukaiseksi lämpötaseyhtälöksi saadaan:

$$dQ_- = dQ_f + dQ_c \quad (3-11)$$

Lähtöoletusten nojalla maaperän lämpötila sekä routaantumisprosessissa vapautuvat lämpömäärät voidaan esittää kuvan 3.3 mukaisesti (Talonrakennuksen routasuojasuojat 1997, Kujala 1994). Kuvassa 3.3 jäätyvän maan jäähtymislämpö (Q_c) on jaettu kahteen osaan. Lämpömäärä Q_{c1} vapautuu maaperän jäähtyessä alkulämpötilasta 0°C :een ja lämpömäärä Q_{c2} jäätyneen maan pintalämpötilan laskiessa 0°C :sta pakkaskauden keskilämpötilaan (T_f). Lämpömäärä Q_{c1} on riippuvainen sulan maan tilavuuslämpökapasiteetista C_u ja lämpömäärä Q_{c2} vastaavasti jäätyneen maan tilavuuslämpö-

kapasiteetista C_f . Lämpömäärät roudan syvyydellä z_f (kuva 3.3) lasketaan Watzingerin mallissa yhtälöillä 3-12 – 3-14.

$$Q_{c1} = C_u \cdot T_u \cdot z_f \quad (3-12)$$

$$Q_{c2} = 0,5 \cdot C_f \cdot |T_f| \cdot z_f \quad (3-13)$$

$$Q_f = q_f \cdot z_f \quad , \text{ joissa} \quad (3-14)$$

Q_{c1} = lämpötilan muutosta T_u :sta 0 °C:een vastaava sulan (myöhemmin jäätyvän) maan jäähtymislämpö, Wh/m^2

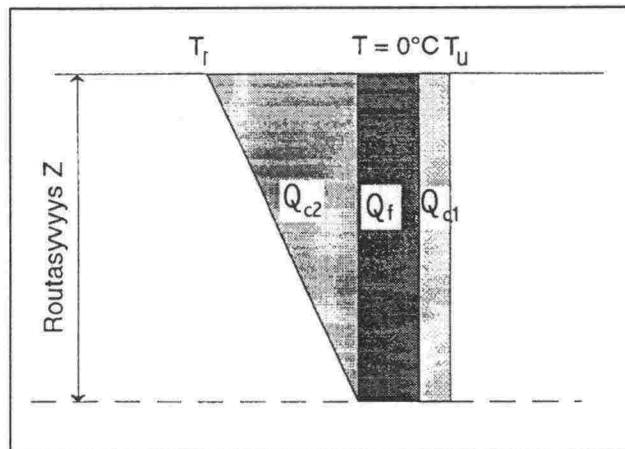
C_u = sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m^3K

T_u = maaperän lämpötila jäätymisprosessin alussa, °C (oletus: T_u = vuotuinen ilman keskilämpötila)

Q_{c2} = (maan pinnan) lämpötilan muutosta 0 °C:sta T_f :ään vastaava jäätyneen maan jäähtymislämpö, Wh/m^2

C_f = jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m^3K

T_f = maan pinnan lämpötila jäätymisprosessin aikana, °C (oletus T_f = pakkas-kauden keskilämpötila)



Kuva 3.3. Lämpötilan jakautuminen ja routaantumisprosessissa vapautuvat lämpömäärät Watzingerin mallin mukaan. Q_{c1} on sulan (myöhemmin jäätyvän) maan- ja Q_{c2} jäätyneen maan jäähtymislämpö. Q_f on maaperän jäähtymislämpö.

Lämpötaseyhtälöstä (3-11) saadaan yhtälöiden 3-12 – 3-14 avulla:

$$\lambda_f \cdot \frac{T_f}{z} \cdot dt = q_f \cdot dz + C_u \cdot T_u \cdot dz - 0,5 \cdot C_f \cdot T_f \cdot dz \quad (3-15)$$

Integroimalla yhtälö 3-15 käsittämään koko pakkasajan voidaan Watzingerin mallin mukainen roudan syvyys laskea seuraavalla kaavalla:

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F}{q_f + C_u \cdot T_u - 0,5 \cdot C_f \cdot T_f}} \quad (3-16)$$

Esitetyn perusteella voidaan todeta, että Watzingerin menetelmä on siinä huomioidun maaperän tilavuuslämpökapasiteetin johdosta Stefanin mallia tarkentava. Maaperästä routautumisprosessin aikana poistuvan lämpövirtauksen osakomponenteista (ks. kappale 2.2.3) Watzingerin mallissa huomioimatta jää vähäpätöisen geotermisen lämmön lisäksi routivassa maassa mahdollinen imeytyvän veden jäähtymislämpö sekä tärkeimpänä routarajalle virtaava sulana pysyvän maan jäähtymislämpö, jonka huomioon ottamiseen keskitytään seuraavassa kappaleessa.

Watzingerin menetelmä on puutteistaan huolimatta pohjoismaissa laajalti käytetty ja se esitetään roudan syvyyden laskentamenetelmäksi mm. Talonrakennuksen routasuojaus-ohjeissa.

3.1.5 Beskowin menetelmä

Beskow kehitti Stefanin menetelmää sulana säilyvän maan jäähtymislämmön huomioimiseksi. Beskow (1935 ja 1947) loi sulan maan jäähtymislämmön huomioimiseksi perustan, jota Skaven-Haug (1971) tarkensi (ks. kappaleet 3.1.7 ja 3.1.8) ja siten mm. mahdollisti tarkastelun kerroksellisessa rakenteessa.

Beskowin malli poikkeaa oletuksiltaan Stefanin mallista siten, että routarajan alapuolella lämpötilaa ei oleteta vakioksi, vaan syvyyden suhteen lineaarisesti kasvavaksi. Tällöin sulasta maasta suuntautuu Fourierin lain mukaisesti alenevan lämpötilan suuntaan (routarajalle) lämpövirta, jonka suuruus on verrannollinen routarajan alapuoliseen, mallissa vakioksi oletettuun lämpötilagradienttiin. Kyseiseen lämpövirtaan voidaan ajatella sisältyvän sulana säilyvän maan jäähtymislämmön (Q_+) lisäksi routautuvaan maahan virtaava geotermien lämpö (Q_g). Beskowin mallin mukaiseksi lämpötaseyhtälöksi saadaan:

$$dQ_- = dQ_f + dQ_+ + dQ_g \quad (3-17)$$

$$\lambda_f \cdot \frac{T_f}{z} \cdot dt = q_f \cdot dz + \lambda_u \cdot G_+ \cdot dt \quad , \text{ joissa} \quad (3-18)$$

dQ_+ = tasealueelle virtaava sulana pysyvän maan jäähtymislämpö, Wh/m^2

dQ_g = tasealueelle virtaava geotermien lämpö, Wh/m^2

λ_u = sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK

G_+ = lämpötilagradientti routarajan alla (ks. kappale 4.5.2), $^{\circ}C/m$

Beskowin mallissa kulloinkin pakkaskauden aikana vallitsevalle routarajalle virtaava lämpömäärä ($Q_+ + Q_g$) vastaa lopullisen (alimman) routarajan yläpuolelle pakkaskauden aikana virtaavaa lämpömäärää. Näin on siksi, koska jonkin pakkaskauden aikana vallitsevan routarajan ja alimman routarajan välille jäävän maaperän jäähtymislämpöä ei huomioida ja lämpötilagradientti kulloinkin vallitsevan routarajan alapuolella oletetaan vakioksi (ts. lämpötila tasaisesti kasvavaksi). Siten tuloksen muuttumatta lämpötasealueena voidaan pitää kulloinkin vallitsevan routarajan differentiaalisen kerroksen sijasta pakkaskauden aikaisen alimman routarajan ja maan pinnan rajaamaa aluetta.

Beskowin kehittämä lisäys on kuitenkin merkittävä, koska Stefanin-Beskowin mallissa huomioitavat maaperän jäätyislämpö sekä sulana säilyvän maan jäätyislämpö muodostavat huomattavan osan etenkin routimattomasta maasta routautumisen aikana poistuvasta lämpömäärästä. Poistuvan lämpömäärän osakomponenteista (ks. kappale 2.2.3) huomioimatta jää jäätyvän maan jäätyislämpö sekä routivassa maassa merkittäväksi tekijäksi muodostuva maahan imeytyvän veden jäätyislämpö. Kun lämpötaseyhtälö 3-18 integroidaan käsittämään koko pakkasajan, saadaan roudan syvyydelle Beskowin mallilla:

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot \left(F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \right)}{q_f}}, \text{ jossa} \quad (3-19)$$

t = pakkaskauden kesto, h

S = lämpötilagradientin (G_+) ja roudan syvyyden (z_f) pakkaskauden aikaisen vaihtelun huomioonottava kokeellinen kerroin; yleensä keskimääräiseksi arvoksi oletetaan $S = 0,7$. (Beskowin mukaan pakkaskauden alussa $S \approx 2/3$ ja lopussa $S \approx 1$ (Skaven-Haug 1971)).

Koska z_f esiintyy kaavassa 3-19 myös juurilausekkeen sisällä, on ratkaisu roudan syvyydelle iteroitava. Kun verrataan juurilausekkeen osoittajaa Stefanin menetelmän vastaavaan voidaan todeta, että sulana pysyvän maan jäätyislämmön routautumista pienentävä vaikutus tulee Beskowin lisäyksen ansiosta huomioiduksi pakkasumman redusointina:

$$F_{red} = F - E, \text{ jossa} \quad (3-20)$$

F_{red} = sulana pysyvän maan jäätyislämmöllä redusoitu pakkasmäärä, $h^\circ C$

E = routarajalle virtaavasta lämmöstä (sulana pysyvän maan jäätyislämpö + geoterminen lämpö) aiheutuva jäätymisvastus, $h^\circ C$

$$E = S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \quad (3-21)$$

Yhdistämällä yhtälöt 3-19, 3-20 ja 3-21 saadaan roudan syvyydelle Beskowin lisäys huomioiden (vrt. Stefanin menetelmän ratkaisu, kaava 3-3):

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F_{red}}{q_f}} \quad (3-22)$$

3.1.6 Watzingerin, Kindemin, Michelsenin menetelmän ja Beskowin menetelmän yhdistelmä

Yhdistämällä Watzingerin, Kindemin, Michelsenin menetelmä sekä Beskowin menetelmä päädytään kaavojen 3-16 ja 3-19 perusteella roudan syvyydelle kaavan 3-23 mukaiseen ratkaisuun.

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot \left(F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \right)}{q_f + C_u \cdot T_u - 0,5 \cdot C_f \cdot T_f}} \quad (3-23)$$

Kappaleissa 3.1.4 ja 3.1.5 esitetyn mukaisesti roudan syvyydelle esitetystä kaavassa 3-23 on maasta routaantumisen aikana vapautuvan lämpömäärän osakomponenteista huomioitu maaperän jäätyislämpö (Q_p), Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin mukainen jäätyvän maan jäätyislämpö ($Q_{cl} + Q_{c2}$) sekä Beskowin lisäyksen nojalla sulan maan jäätyislämpö (Q_+) ja geoterminen lämpö (Q_g).

3.1.7 Skaven-Haugin – Watzingerin menetelmä

Norjassa toteutetun Frost i jord -tutkimusprojektin tuloksena (Johansen & Frivik 1976) roudan syvyydelle esitettiin laskentamalli, jossa huomioidaan jäätyneen maan jäätyislämpöä (Q_{c2}) lukuunottamatta kaikki yhtälössä 2-3 esitetyt lämpövirtauksen osatekijät maan jäätymisprosessissa. Malli perustuu routarajan alapuolelta virtaavan lämmön osalta Skaven-Haugin laajoihin lämpötilahavainnointeihin tie- ja rautatie-rakenteissa ja on siten osittain empiirinen. Maaperän jäätyislämmön laskenta perustuu Watzingerin tarkasteluihin, joten voitaneen puhua Skaven-Haugin – Watzingerin menetelmästä. Menetelmän lämpötaseyhtälö routarajalla voidaan kirjoittaa:

$$dQ_- = dQ_0 + dQ_f \quad , \text{ jossa} \quad (3-24)$$

Q_0 = routarajalle sen alapuolelta pakkaskauden aikana virtaava kokonaislämpömäärä, Wh/m^2

Sulan maan jäätyislämmön huomioon ottaminen poikkeaa edellisessä kappaleessa esitetystä Beskowin periaatteesta siten, että Skaven-Haugin mallissa routarajan alapuolelta virtaava lämpömäärä määritetään (kulloinkin vallitsevalle) routarajalle pakkaskauden aikana virtaavana kokonaislämpömääränä (Q_0), joka määräytyy empiirisiin tutkimuksiin nojautuen maalajin ja ilmastoparametrien (ilman vuotuinen keskilämpötila ja ilman talven lämpötila-amplitudi) perusteella (ks. kuva 3.4). Näin ollen kokonaislämpömäärä Q_0 sisältää periaatteessa seuraavat tekijät yhtälöstä 2-3:

$$dQ_0 = dQ_+ + dQ_k + dQ_v + dQ_g + dQ_{cl} \quad , \text{ jossa} \quad (3-25)$$

Q_{cl} = lämpötilan laskua pakkaskauden alkuperäisestä lämpötilasta $0\text{ }^\circ\text{C}$:een vastaava sulan (myöhemmin jäätyvän) maan jäätyislämpö, Wh/m^2

Täten maasta routaantumisen aikana vapautuvan lämpömäärän osakomponenteista Skaven-Haugin – Watzingerin mallissa jää huomioimatta ainoastaan vähäpätöisen merkityksen omaavaksi todettu jäätyneen maan jäähtymislämpö (Q_{c2}) (vrt. kappale 3.1.4).

Yhtälöstä 3-24 saadaan:

$$\lambda_f \cdot \frac{T_f}{z} \cdot dt = q_0 \cdot dt + q_f \cdot dz \quad , \text{ jossa} \quad (3-26)$$

$$q_0 = (\text{kokonais})\text{lämpövirta routarajalle, } W/m^2$$

Kun jäätyneen maaperän jäähtymislämpö oletetaan merkityksettömäksi, voidaan lämpötilagradientti jäätyneessä maassa (T_f/z) olettaa vakioksi. Integroitaessa yhtälöä 3-26 pakkaskauden aikana routarajalle virtaava kokonaislämpömäärä ($Q_0 = \int q_0 \cdot dt$) määrätään empiirisesti, jolloin saadaan:

$$F = \frac{q_f \cdot z_f^2}{2 \cdot \lambda_f} + Wt \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \cdot Q_0 \quad , \text{ jossa} \quad (3-27)$$

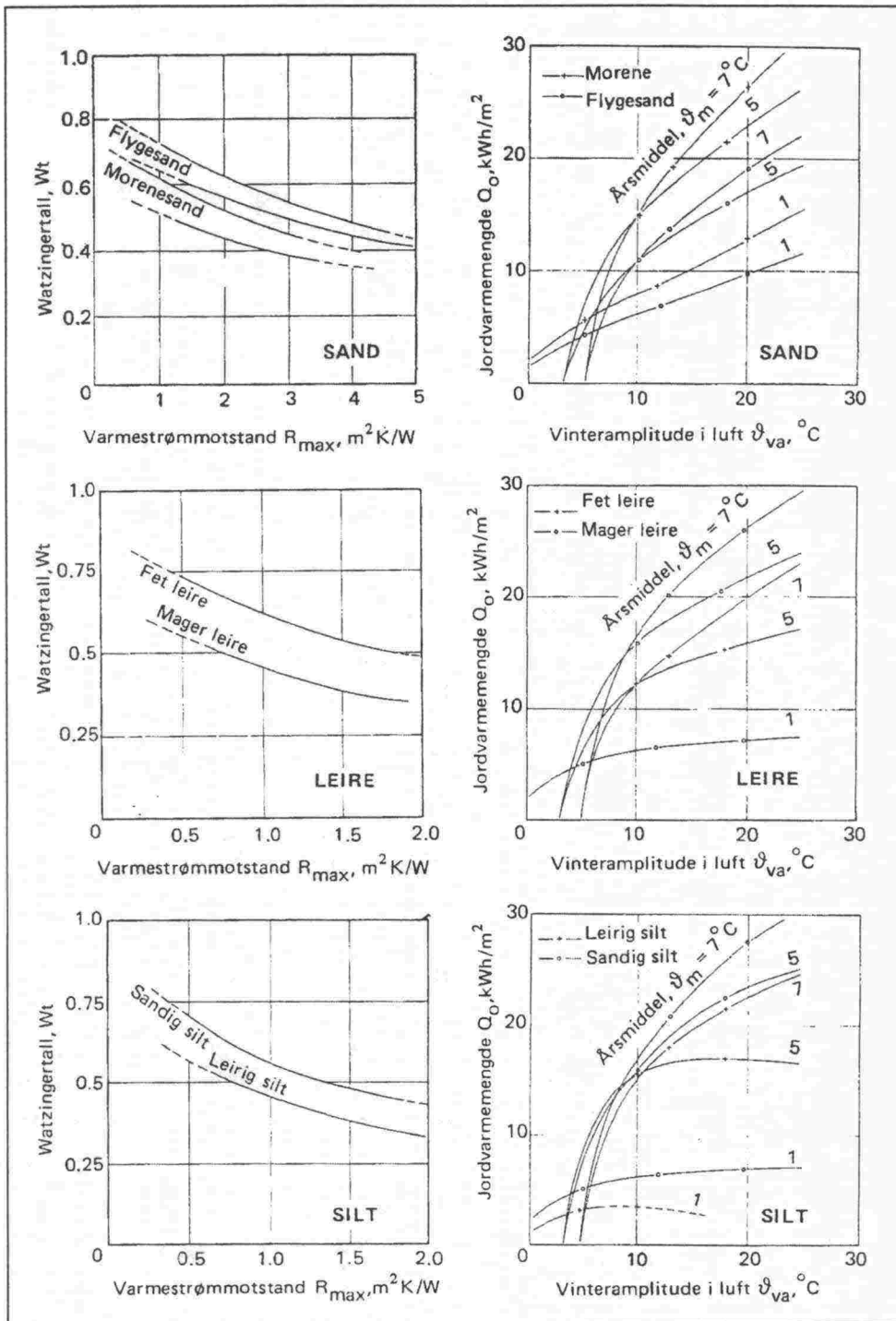
$$F = \text{pakkassumma maanpinnassa, } h^\circ C$$

$$Wt = \text{Watzingerin luku, empiirinen korjauskerroin}$$

Routarajalle virtaava kokonaislämpömäärä (Q_0) samoin kuin maaperän lämmönvastuksesta ja maalajista riippuva Watzingerin luku (Wt) määritetään kuvasta 3.4 (Johansen & Frivik 1976). Yhtälöstä 3-27 Skaven-Haugin – Watzingerin mallin mukaiseksi iteroitavaksi ratkaisuksi roudan syvyydelle voidaan lausua:

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot \left(F - Wt \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \cdot Q_0 \right)}{q_f}} \quad (3-28)$$

Lähteen (Mäkelä et. al. 1986) mukaan Watzingerin lukua voidaan arvioida käyttämällä eri maalajeissa seuraavia arvoja: hiekalle ja soralle $Wt = 0,70$, savelle $Wt = 0,50$, siltille $Wt = 0,55$ ja moreenille $Wt = 0,65$.



Kuva 3.4. Routarajalle virtaavan kokonaislämpömäärän (Q_0) ja Watzingerin luvun (Wt) määrittäminen homogeenisessa lumettomassa maassa vallitsevia ilmasto-olosuhteita kuvaavien ilman vuotuisen keskilämpötilan (θ_m) ja talven lämpötila-amplitudin (θ_{va}) sekä routaantuvan maaperän lämmönvastuksen ($R_{max} = z/\lambda_p$) ja maalajin perusteella (Johansen & Frivik 1976). Talven lämpötila-amplitudi on vuoden keskilämpötilan ja kylmimmän kuukauden keskilämpötilan erotus (Heiersted 1976).

Routarajalle virtaava lämpömäärä huomioidaan Skaven-Haugin mallissa roudan syvyyttä pienentävänä tekijänä vastaavalla tavalla kuin Beskowin lisäyksessä (vrt. yhtälöt 3-19 ja 3-28 tai 3-21 ja 3-31) pakkassummaa redusoidamalla. Skaven-Haugin mallissa termi (E), jolla pakkasmäärää redusoidaan, tulisi malleissa huomioitavien

vapautuvan lämpömäärän osakomponenttien nojalla olla suurempi ja siten mitoittava pakkasmäärä ja roudan syvyys pienempi kuin Beskowin mallissa. Skaven-Haugin – Watzingerin mallin yhtälön 3-27 termejä kuvataan usein seuraavasti:

$$F = \Omega + E, h^{\circ}\text{C}, \text{ jossa} \quad (3-29)$$

Ω = jäätymisvastus routaantuvan maaperän jäätyislämmöstä, $h^{\circ}\text{C}$

E = jäätymisvastus sulasta maasta routarajalle virtaavasta lämmöstä, $h^{\circ}\text{C}$

$$\Omega = \frac{q_f \cdot z_f^2}{2 \cdot \lambda_f} \quad (3-30)$$

$$E = Wt \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \cdot Q_0 \quad (3-31)$$

Routaantuvan maaperän jäätymisvastuksen (Ω) merkitys yhtälössä 3-29 korostuu silloin, kun maaperä on kosteaa, jolloin maaperän sisältämän veden jäätyislämpö on merkittävä tekijä maasta routaantumisen aikana poistuvasta lämpömäärästä. Vastaavasti routarajalle virtaavasta lämmöstä aiheutuva jäätymisvastus (E) saattaa muodostua jopa jäätyvän maaperän jäätymisvastusta merkittävämmäksi tekijäksi erityisesti routaeristetyssä tai suhteellisen kuivassa maaperässä.

Yhtälöstä 3-28 voidaan havaita, että mikäli routarajalle virtaava kokonaislämpö (Q_0) oletetaan merkityksettömäksi päädytään Stefanin menetelmän ratkaisuun (vrt. yhtälö 3-5).

3.1.8 Roudan syvyyden laskentamenetelmät kerroksellisessa rakenteessa

Kerroksellisessa rakenteessa, kuten radassa, homogeeniselle rakenteelle kappaleissa 3.1.2-3.1.7 esitettyjä roudan syvyyden laskentakaavoja ei voida sellaisenaan soveltaa, koska kaavojen termit, lämmönjohtavuudet ja lämpösisältö samoin kuin kerrospaksuus vaihtelevat rakennekerroksittain.

Roudan syvyyden laskenta kerroksellisessa rakenteessa perustuu ns. ”st. Paulin” osittaispakkasmäärämenetelmään (Ehrola 1974a), jossa määritetään roudan paksuus alimmassa jäätyvässä kerroksessa. Menetelmän mukaan kunkin routaantuvan kerroksen (i) jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä (F_i) voidaan laskea kaavan 3-32 mukaan.

$$F_i = q_i \cdot d_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{d_j}{\lambda_{fi}} + \frac{d_i}{2\lambda_{fi}} \right), \text{ jossa} \quad (3-32)$$

F_i = kerroksen i jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä, $h^{\circ}\text{C}$

q_i = jäätyvän kerroksen i lämpösisältö, Wh/m^3

d_i = jäätyvän kerroksen i paksuus, m

λ_{fi} = jäätyneen kerroksen i lämmönjohtavuus, W/Km

Kaavan 3-32 perusteella alimman routaantuvan kerroksen (n) jäätymiseen käytettävissä oleva pakkasmäärä (F_n) on:

$$F_n = F - \sum_{i=1}^{n-1} F_i, \text{ jossa} \quad (3-33)$$

n = tarkasteltavien kerrosten lukumäärä

Roudan syvyys rakenteessa voidaan laskea, kun ratkaistaan kaavojen 3-32 ja 3-33 avulla roudan paksuus (d_n) alimmassa routaantuvassa kerroksessa (kaava 3-35). Tällöin roudan syvyydelle saadaan:

$$z_f = \sum_{i=1}^{n-1} d_i + d_n \quad (3-34)$$

$$d_n = -\lambda_{fn} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_{fi}} + \sqrt{\lambda_{fn}^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \right)^2 + \frac{2\lambda_{fn}}{q_n} \cdot \left(F - \sum_{i=1}^{n-1} F_i \right)}, \text{ jossa} \quad (3-35)$$

λ_{fn} = alimman tarkasteltavan kerroksen n lämmönjohtavuus jäätyneenä, W/Km

Seuraavassa esitetään aiemmin homogeeniselle rakenteelle kuvattujen mallien mukaiset roudan syvyyden laskentakaavat kerroksellisessa rakenteessa.

Berggrenin menetelmä (vrt. kappale 3.1.3)

Roudan syvyys kerroksellisessa rakenteessa lasketaan Berggrenin menetelmällä kaavalla 3-34. Kerroksen i jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä lasketaan kaavalla 36 (Phukan 1989), jolloin kaavassa 3-34 tarvittava roudan paksuus alimmassa routaantuvassa kerroksessa (d_n) voidaan laskea kaavalla 3-37.

$$F_i = \frac{q_{fi} \cdot d_i}{2\psi^2} \cdot \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{d_j}{\lambda_{fj}} + \frac{d_i}{2\lambda_{fi}} \right) \quad (3-36)$$

$$d_n = -\lambda_{fn} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_{fi}} + \sqrt{\lambda_{fn}^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \right)^2 + \frac{2\lambda_{fn} \cdot \psi^2}{q_{fn}} \cdot \left(F - \sum_{i=1}^{n-1} F_i \right)} \quad (3-37)$$

Alkuperäistä Stefanin menetelmää tarkentava, jäätyvän maan jäähtymislämmön huomioon ottava korjauskerroin (ψ) määritetään kaavaan 3-37 kuvasta 3.2 lämpösuhteen (α) ja parametrin μ avulla (vrt. kappale 3.1.3). Lämpösuhte lasketaan vastaavasti kuin homogeenisen maan kohdalla (kaava 3-9). Sen sijaan parametri μ määritetään kerroksellisessa rakenteessa homogeenisesta tilanteesta poikkeavasti kaavalla 3-38 (Saarelainen 1990), jonka merkinnät vastaavat kaavassa 3-10 käytettyjä.

$$\mu = \frac{T_f \cdot \sum_{i=1}^n (C_i \cdot d_i)}{\sum_{i=1}^n (q_{fi} \cdot d_i)} \quad (3-38)$$

Huomioina Berggrenin menetelmästä voidaan todeta, että siinä maakerroksen lämpösisältönä (q_i kaavassa 3-32) huomioidaan ainoastaan kerroksen jäätymislämpö (q_{fi}). Toisaalta jäätyvän maan jäähtymislämpö huomioidaan kertoimella (ψ).

Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmä (vrt. kappale 3.1.4)

Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmässä roudan syvyys kerroksellisessa rakenteessa lasketaan kaavoilla 3-32 – 3-35. Huomioitavaa on, että routaantuvan maakerroksen lämpösisältö (q_i) lasketaan kappaleessa 3.1.4 esitetyn mukaisesti kaavalla 3-39, jolloin maasta routaantumisprosessin aikana vapautuvan lämpömäärän osakomponenteista huomioiduksi tulee maakerroksen jäätymislämmön lisäksi maakerroksen jäähtymislämpö.

$$q_i = q_{fi} + C_{ui} \cdot T_u + 0,5 \cdot C_{fi} \cdot |T_f| \quad , \text{ Wh/m}^3 \quad (3-39)$$

Beskowin menetelmä (vrt. kappale 3.1.5)

Sulan maan jäähtymislämmöstä aiheutuva jäätymisvastus (E) lasketaan kerroksellisessa rakenteessa Beskowin menetelmästä Skaven-Haugin (1971) kehittämällä kaavalla 3-40 (vrt. kaava 3-21), jolloin redusoitu pakkassumma voidaan laskea kaavalla 3-41 (vrt. kaava 3-20).

$$E = S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \quad (3-40)$$

$$F_{red} = F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \quad (3-41)$$

Beskowin menetelmän mukainen roudan syvyys kerroksellisessa rakenteessa lasketaan kaavalla 3-34. Alimman routaantuvan kerroksen (n) jäätyvä paksuus (d_n) lasketaan kaavalla 3-35 muutettuna siten, että pakkassumman (F) tilalla käytetään kaavan 3-41 mukaista redusoitua pakkassummaa (F_{red}). Koska tällöin alimman routaantuvan kerroksen jäätyvä paksuus (d_n) sisältyy kaavassa 3-35 myös termiin (F_{red}), on ratkaisu iteroitava.

Yhdistetty Watzinger, Kindem, Michelsenin ja Beskowin menetelmä (vrt. kap. 3.1.6)

Yhdistämällä edellä esitetyt Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmä sekä Beskowin menetelmä voidaan roudan syvyys laskea kerroksellisessa rakenteessa kaavoilla 3-32 – 3-35, kun niihin sisällytetään molemmille menetelmille edellä esitetyt lisähuomiot, eli kaavoissa 3-32 ja 3-35 tarvittava routaantuvan maakerroksen lämpö-

sisältö (q_i) lasketaan kaavalla 3-39 ja alimman routaantuvan kerroksen (n) jäätyvän paksuuden (d_n) laskennassa käytetään kaavassa 3-35 pakkasumman (F) tilalla kaavan 3-41 mukaista redusoitua pakkasummaa (F_{red}).

Skaven-Haugin – Watzingerin menetelmä (vrt. kappale 3.1.7)

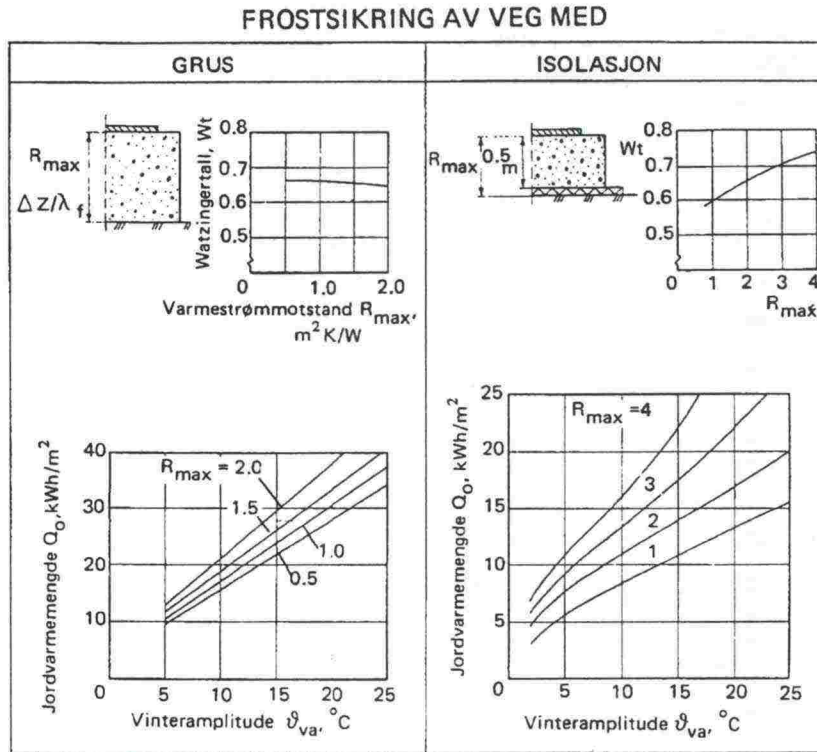
Skaven-Haugin – Watzingerin menetelmässä routarajalle virtaavan lämmön aiheuttama jäätymisvastus (E) lasketaan kerroksellisessa rakenteessa kaavalla 3-42 (vrt. kaava 3-31), jolloin redusoidulle pakkasummalle (F_{red}) saadaan kaava 3-43.

$$E = W_t \cdot Q_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \quad (3-42)$$

$$F_{red} = F - W_t \cdot Q_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \quad (3-43)$$

Laskelmissa vaadittava Watzingerin luku (W_t) samoin kuin routarajalle virtaava kokonaislämpömäärä (Q_0) määritetään vastaavalla tavalla kuin homogeenisessa maaperässä empiirisesti laaditusta diagrammista (kuva 3.5). Diagrammi on laadittu tie-rakenteelle, mutta soveltunee käytettäväksi myös ratarakennetta koskevissa laskelmissa.

Roudan syvyys lasketaan kaavalla 3-34, jossa alimman routaantuvan kerroksen (n) jäätyvä paksuus (d_n) lasketaan vastaavalla tavalla kuin Beskowin menetelmässä kaavalla 3-35 muutettuna siten, että pakkasumman (F) tilalla käytetään kaavan 3-43 mukaista redusoitua pakkasummaa (F_{red}). Tässäkin tapauksessa alimman routaantuvan kerroksen jäätyvä paksuus (d_n) sisältyy kaavassa 3-35 termiin (F_{red}), joten ratkaisu on iteroitava.



Kuva 3.5. Routarajalle virtaavan kokonaislämpömäärän (Q_0) ja Watzingerin luvun (Wt) määrittäminen kerroksellisessa soralla tai eristelevyllä routasuojatussa tierakenteessa vallitsevia ilmasto-olosuhteita kuvaavan talven lämpötila-amplitudin (θ_{va}) sekä routaantuvan maaperän lämmönvastuksen ($R_{\max} = \sum(d/\lambda_f)$) perusteella (Johansen & Frivik 1976).

3.1.9 Kenttähavaintomallit

Roudan syvyyden määrittämismalleja on etsitty myös kenttämittauksin. Pyrkimyksenä on yleensä ollut kenttähavaintojen perusteella roudan syvyyden ja pakkassumman neliöjuuren välisen yhteyden, eli kaavan 3-44 kertoimen k määrittäminen.

$$z_f = k\sqrt{F} \quad , \text{ jossa} \quad (3-44)$$

$$k = \text{routaantumiskerroin, } m/\sqrt{h^{\circ}\text{C}}$$

Kenttämittausten perusteella luodun mallin etuna on, että siinä tulevat huomioiduksi kaikki maasta jäätymisprosessin aikana poistuvan lämpövirtauksen osatekijät. Toisaalta kertoimelle k saadut arvot ja siten koko malli pätee tarkasti ottaen vain mittauspaikkakunnalla tarkasteluvuonna vallitsevissa ilmasto-oloissa havaintokohteen routaantumisoloiissa. Kerrointa k kutsutaan myös ns. maalajikertoimeksi, vaikkakin se pätee tietyille maalajille ainoastaan suuntaa-antavasti. Kertoimen korrelaatio maalajin kanssa perustuu siihen, että maan kosteuspitoisuus riippuu maalajista (maan rakeisuudesta), mutta toisaalta kosteuspitoisuuteen vaikuttavat myös mm. alueen kuivatusolot ja pinnanmuodot, jonka seurauksena maalajikerrointa k ei voida yleistää koskemaan kaikkia mittauspaikkakunnan maalajeja.

Koska kerroin k perustuu kentällä tehtyihin mittauksiin, sen arvoon sisältyy sulan maan jäähtymislämmön huomiointi, eikä pakkasmäärää kenttähavaintomalleissa täten tule redusoida. On huomattava myös, että mm. maaperään varastoituneen lämpömäärän suuruus riippuu olennaisesti paikkakunnasta, jonka johdosta kerroin k pätee alueellisestikin vain mittauspaikkakunnalla.

Taulukossa 3.2 nähdään kertoimelle k Ehrolan (1996) esittämät laajoihin eri puolilla Suomea tehtyihin kenttähavaintoihin perustuvat arvot lumettomassa maassa eri maalajiryhmille. Taulukosta nähdään, että kerroin k ja siten myös roudan syvyys kasvaa maalajin karkeistuessaa, mikä johtuu luonnollisesti hienorakeisten maalajien karkeampia suuremmasta vesipitoisuudesta ja siten suuremmasta jäähtymislämpömäärästä.

Taulukko 3.2. Maalajikertoimen (routaantumiskertoimen) k arvoja eri materiaaliryhmille, kun maan pinta on lumeton (Ehrola 1996).

| | Maalajiryhmä | Vesipitoisuus, p-% | Kerroin k |
|-----|--------------------------|--------------------|-------------|
| 0 | Louhe | | 0,0150 |
| I | Sr Hk SrMr HkMr | 8-11 | 0,0115 |
| II | Si SiHk SiMr | 17-21 | 0,0100 |
| III | Sa SaSi | 23-44 | 0,0085 |
| IV | Turve | | 0,0060 |

Lähteessä (Mäkelä et. al. 1986) todetaan maalajikertoimen vaihtelevan maalajista, tiiviydestä ja vesipitoisuudesta riippuen yleensä välillä 0,008 (savi) ...0,012 (hiekkä, sora), louheelle todetaan voitavan käyttää arvoa 0,015-0,018.

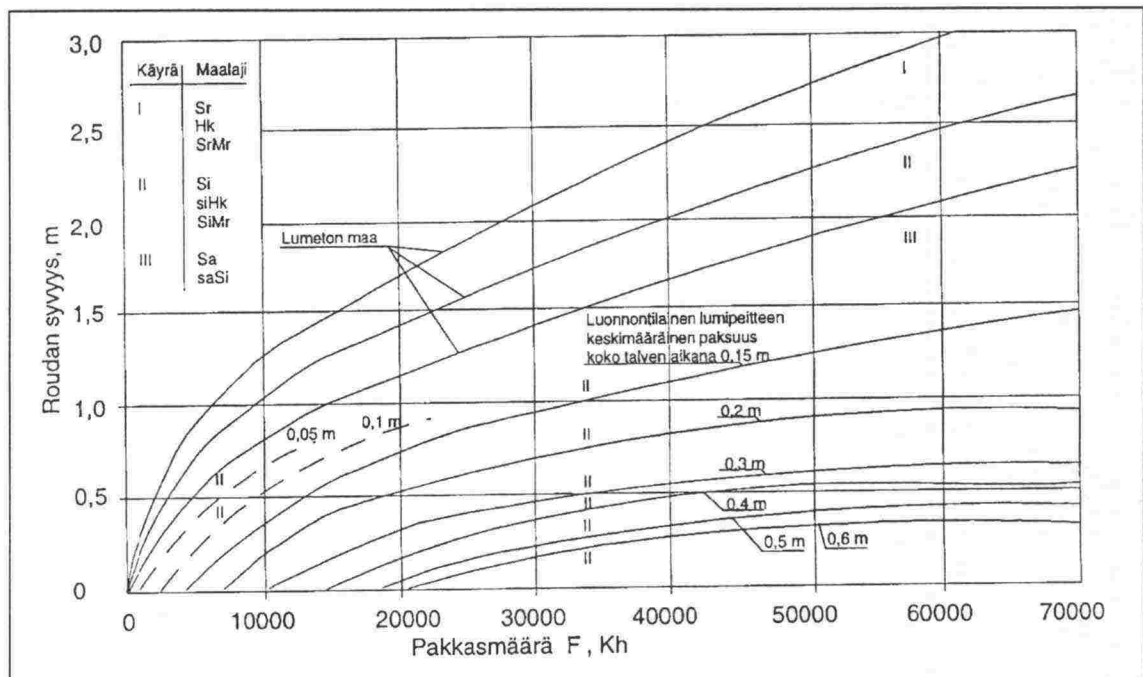
Hentilä et al. (1994) esittävät McCormickin lentokenttä- ja tierakenteista määrittämiä kertoimen k arvoja, jotka ovat jonkin verran suurempia kuin taulukossa 3.2 esitetyt. McCormickin määrittämät keskimääräiset maalajikertoimet vaihtelevat hyvin plastisen saven arvosta $k = 0,0097$ hiekan (mitatuista karkearakeisin) arvoon $k = 0,0129$. Hentilä et al. (1994) esittävät myös Saarelaisen ja Oraman määrittämiä arvoja kertoimelle k eri maalajeissa. Nämä kertoimet vastaavat melko hyvin taulukon 3.2 kertoimia, mutta ovat keskimääräisesti hieman taulukon arvoja suurempia, kuitenkin vähemmän kuin McCormickin määrittämät arvot.

Hentilä et al. (1994) ovat verranneet kenttäkohteista mittaamia roudan syvyyksiä Oraman ja McCormickin vastaaville maalajeille määrittämällä kertoimilla laskettuihin roudan syvyyksiin (ks. taulukko 3.3). Tuloksista voidaan todeta McCormickin määrittämällä kertoimilla laskettujen roudan syvyyksien olevan varsin lähellä mitattuja roudan syvyyksiä. Koska McCormickin määrittämät kertoimet ovat hieman suurempia kuin taulukossa 3.2 esitetyt kertoimet, laskelmissa lienee tarpeen käyttää kertoimelle k n. 10 % taulukossa 3.2 esitettyjä suurempia arvoja. Näin on etenkin, jos maalajin vesipitoisuus on keskimääräistä alhaisempi.

Taulukko 3.3. Kenttäkohteista mitatun roudan syvyyden [m] vertailu Oraman ja McCormikin vastaaville maalajeille määrittämällä kertoimilla k laskettuihin roudan syvyyksiin (Hentilä et al. 1994).

| Kohde | Kontula | Nummi – Pusula | Jyväskylä | Oulunsuu | Kempele – Oulunsalo |
|-----------------------------------|---------|-------------------|-----------|----------|------------------------|
| Oraman Kertoimella | 0,98 | 0,7 | 0,9 | 1,3 | 1,6 |
| McCormikin kertoimella | 0,89 | 1,1 | 1,4 | 1,9 | 1,6 |
| Mitattu | 0,81 | 1,2 | 1,3 | 1,63 | 1,6 |

Taulukon 3.2 mukaisilla kertoimilla saadaan roudan syvyydelle maalajiryhmissä I, II ja III kuvan 3.6 mukainen riippuvuus pakkasummasta. Kuvasta on nähtävissä myös luonnontilaisen lumipeitteen paksuuden vaikutus roudansyvyyteen.



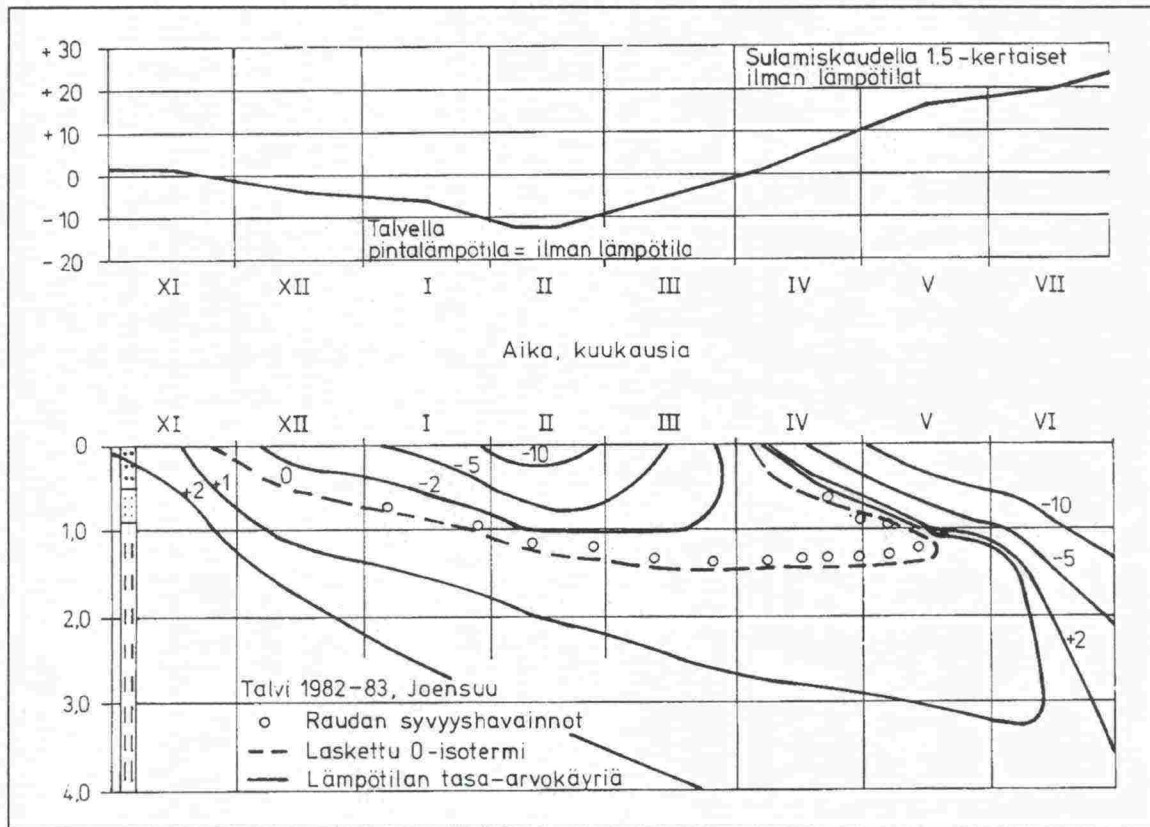
Kuva 3.6. Kenttähavaintoihin perustuva roudan syvyyden ja pakkasmäärän välinen yhteys eri maalajiryhmissä ja luonnontilaisen lumikerroksen paksuuden vaikutus roudan syvyyteen (Soveri & Varjo 1977).

3.1.10 Numeeriset roudan syvyyden laskentamenetelmät

Roudan syvyys voidaan laskea likimääräisratkaisuja käyttämättä numeerisesti elementti- tai differenssimenetelmällä. Tällöin tarkastelut on mahdollista tehdä myös moniulotteisesti, mikä saattaa olla tarpeen suhteellisen kapean ratarakenteen routaantumisprosessia tarkasteltaessa (ks. kappale 2.2.1).

Maan jäätyminen seurauksena lämpötilakenttään aiheutuva ajasta riippuva epäjatkuvuus hankaloittaa maan lämpötekniisten laskelmien suorittamista yleisillä elementtiohjelmilla (Saarelainen 1990). Saarelainen toteaa Helanderin selvitellessä ADINAT-elementti-

ohjelman soveltuvuutta roudan kehittymisen arviointiin. Selvityksen mukaan ohjelmiston avulla on mahdollista tehdä kohtuullisen luotettavia arvioita tietyissä sovelluskohteissa (Saarelainen 1990). Kuvassa 3.7 on esitetty esimerkki katurakenteesta mitatun ja lasketun roudan syvyyden vertailusta (Helander 1986). Nykyisin roudan syvyyden laskemiseksi on käytettävissä useita elementtimenetelmiin pohjautuvia laskentaohjelmia, kuten ADINAT, ANSYS, CRREL, FRACS, GEL 1d, SOIL, TDCH (Kujala 1994, Ehrola 1996).



Kuva 3.7. Joensuussa sijaitsevan katurakenteen routaantumisanalyysin tulokset ja kohteesta mitatut roudan syvyydet talvella 1982-83 (Helander 1986).

3.2 Routanousun laskentaan perustuvat menetelmät

3.2.1 Yleistä

Edellä kappaleessa 3.1 kuvatuissa ns. roudan syvyyteen perustuvissa routamitoitusmenetelmissä on periaatteena mitoittaa routimattomiksi oletetut rakennekerrokset paksuudeltaan sellaisiksi, että mitoituslaskenta roudan tunkeutuminen routivaan maahan on kokonaan estetty. Kohteissa, joissa sallitaan tietyn suuruista routimisen aiheuttamaa routanousua, voidaan routasuojaus mitoittaa ns. routanousun laskentaan perustuvilla menetelmillä. Tällöin myös routivan maan routaantuminen sallitaan tietyltä, maan routivuudesta riippuvalta, paksuudelta. Yllä olevien routimattomien rakennekerrosten mitoituksella määrätään routivasta maasta mitoituslaskentaan perustuva paksuus sellaiseksi, että sen seurauksena syntyvä routanousu ei ylitä sallittua. Menettely edellyttää routivan maan routivuuden tuntemusta, jotta tietyn kerrospaksuuden routaantumisen aiheuttamaa routanousua pystytään arvioimaan (ks. kappale 4.8).

Korostettakoon, että ratarakenteen routamitoituksessa käytetään raiteen suuren tasaisuusvaatimuksen vuoksi kuitenkin yleensä roudan syvyyteen perustuvia laskentamenetelmiä, eikä routivan pohjamaan routaantumista mitoitustalvena siten sallita.

Routanousun laskentamalleja on lukuisia. Mallit voidaan jakaa empiirisiin, semi-empiirisiin, hydrodynaamisiin, termomekaanisiin sekä sekundaarisen routanousun malleihin (Kujala 1994, Kauppi, 2000). Seuraavassa on esitetty lyhyesti erään semi-empiirisen mallin, eli ns. segregaatiopotentiaalteorian mukaisen routanousun laskennan perusteita sekä hieman tarkemmin siihen perustuvaa mm. tierakenteen routamitoituksessa käytettävää laskentamallia.

3.2.2 Segregaatiopotentiaalteoria

Segregaatiopotentiaalteorian nojalla maan routaantumista aiheutuva routanousu on mahdollista laskea, kun tunnetaan maaperän routivuutta kuvaava ns. segregatiopotentiaali (routimiskerroin) ja jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradientti. Segregaatiopotentiaalteorian perusoletus on, että veden virtausnopeus $v(t)$ jäälinssin kasvuprosessin aikana on suoraan verrannollinen jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradienttiin $G_-(t)$ kaavan 3-45 mukaisesti. Verrannollisuuskerrointa kutsutaan segregatiopotentiaaliksi (SP_o). Konrad (1980) osoitti, että laboratorio-oloissa veden virtaus routarajalle noudattaa kyseistä vuorosuhdetta. Hän totesi myös, että segregatiopotentiaali on riippuvainen maalajin lisäksi vedensaantiolosuhteista ja jännitysoloista routarajalla. Myöhemmin mm. Nixon 1982, Jessberger 1989 ja Saarelainen 1989 ovat todenneet periaatteen pätevän myös kenttäolosuhteissa (Saarelainen 1993).

$$\frac{dv_w}{dt} = SP_o(t) \cdot G_-(t) \quad , \text{ jossa} \quad (3-45)$$

$$\begin{aligned} dv_w/dt &= \text{veden virtausnopeus jäälinssin muodostukseen, m/h} \\ SP_o &= \text{segregatiopotentiaali, m}^2/Kh \\ G_- &= \text{lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa routarajalla, } ^\circ C/m \end{aligned}$$

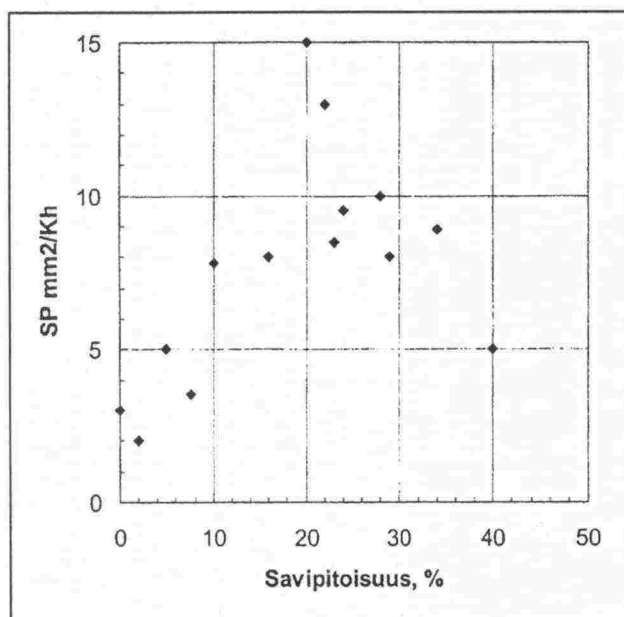
Kun huomioidaan veden jäätyminen yhteydessä tapahtuva noin 9 % tilavuuden kasvu, saadaan kaavan 3-45 perusteella routimisesta ajanjaksolla t aiheutuvalle routanousulle (Nixon 1982, Konrad 1980):

$$h_s = 1,09 \cdot t \cdot SP_\sigma \cdot G_- \quad , \text{ jossa} \quad (3-46)$$

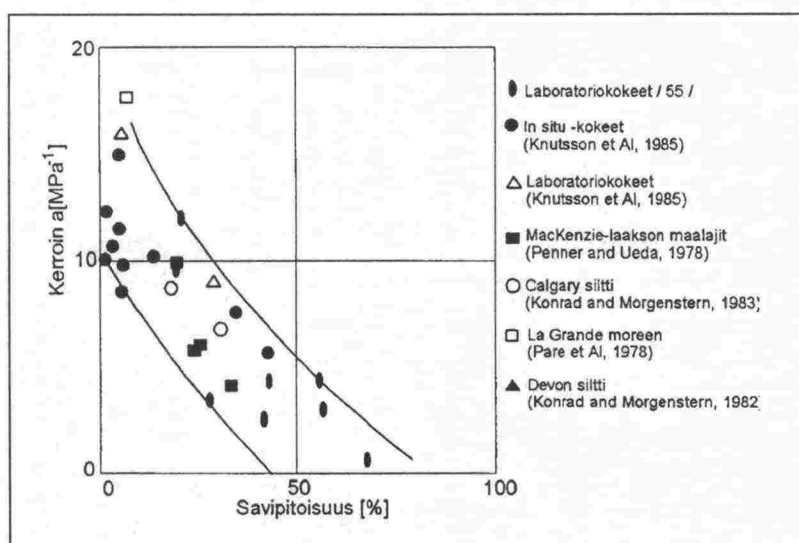
$$\begin{aligned} h_s &= \text{routarintamaan ulkopuolisesta lähteestä imeytyneen veden (jäälinssin muodostumisen) aiheuttama routanousu, m} \\ SP_\sigma &= \text{todellista kuormitusta vastaava segregatiopotentiaali, m}^2/Kh \\ t &= \text{tarkasteltava ajanjakso, h} \\ G_- &= \text{lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa routarajalla, K/m} \end{aligned}$$

On selvää, että segregatiopotentiaalin luotettava määrittäminen on keskeisessä osassa segregatiopotentiaalteorian mukaisessa routanousun laskennassa. Jos käytettävissä on kohdehavaintoja, voidaan segregatiopotentiaali määrittää (takaisinlaskea) mitatun routanousun, roudan syvyyden ja pakkasmäärän sekä pohjamaan ominaisuuksien perusteella. Segregaatiopotentiaalia voidaan likimääräisesti arvioida myös laborato-

riossa tehdyn routanousukokeen perusteella. Karkeita arvioita segregatiopotentiaalin suuruusluokasta on mahdollista esittää rakeisuustietojen, hienoustekijän tai savi-pitoisuuden (kuva 3.8) nojalla. On kuitenkin huomattava, että segregatiopotentiaalin yleistäminen tehtyjen mittausten perusteella tietyille maalajille ei ole mahdollista, sillä segregatiopotentiaali on riippuvainen routarajan yläpuolisesta kuormituksesta sekä pohjavedenpinnan asemasta. Pohjavedenpinnan alhainen asema suurentaa imu-kuormitusta routarajalla ja pienentää siten routanousua. Päällä olevien rakenteiden paino vaikuttaa periaatteeltaan vastaavasti. Segregatiopotentiaalin jännitystilariippuvuus on kaavan 3-47 mukainen (Jessberger & Jagow, 1989, Ehrola 1996). Kerroin a riippuu maan savi-pitoisuudesta kuvan 3.9 mukaisesti.



Kuva 3.8. Routimiskertoimen SP (routimiskerroin = $1,09 \cdot \text{segregatiopotentiaali}$) riippuvuus savipitoisuudesta eräiden kenttähavaintokohteiden mukaan (Saarelainen & Kivikoski 2000).



Kuva 3.9. Kaavan 3-47 kertoimen a riippuvuus maan savipitoisuudesta (Jessberger & Jagow 1989, Ehrola 1996).

$$SP_{\sigma} = SP_0 \cdot e^{-a \cdot q} \quad , \text{ jossa} \quad (3-47)$$

| | |
|-----------------|---|
| SP_{σ} | = segregatiopotentiaali kuormalla σ , m^2/Kh |
| SP_0 | = segregatiopotentiaali nollakuormalla, m^2/Kh |
| e | = Neperin luku |
| a | = kerroin, MPa^{-1} |
| $q = q_i + q_p$ | = kokonaiskuorma, MPa |
| q_i | = imukuorma, MPa |
| q_p | = pintakuorma, MPa |

Kokonaisroutanousu muodostuu routimisen aiheuttamasta routanoususta (kaava 3-46) sekä maan sisältämän huokosveden jäätyessä tapahtuvan veden noin 9 % tilavuuden kasvun aiheuttamasta routanoususta (in-situ routanousu). In-situ routanousun muodostumisen edellytyksenä on, että jäätyvä maaperä on veden kyllästämä, jolloin in-situ routanousu voidaan laskea kaavasta 3-48.

$$h_0 = 0,09 \cdot \frac{w}{100} \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot z \quad , \text{ jossa} \quad (3-48)$$

| | |
|------------|---|
| h_0 | = huokosveden in-situ -jäätymisestä aiheutuva routanousu, m |
| w | = maan vesipitoisuus, $p\%$ |
| γ_d | = maan kuivatilavuuspaino, kN/m^3 |
| γ_w | = veden kuivatilavuuspaino, kN/m^3 |
| z | = jäätyvän kerroksen paksuus, m |

Saarelaisen (Saarelainen 1992, Saarelainen & Kivikoski 2000) mukaan homogeenisessa pohjamaassa routanoususuhde on likimäärin muotoa:

$$\varepsilon_f = \frac{h}{z_f - z_0} = \frac{h}{k\sqrt{F} - z_0} = \frac{2SP}{k^2} + 0,09 \cdot \frac{w_v}{100} \quad , \text{ jossa} \quad (3-49)$$

| | |
|-----------------|--|
| ε_f | = routanoususuhde, - |
| h | = routanousu, m |
| z_f | = routan kokonaissyvyys, m |
| z_0 | = routimattomien kerrosten kokonaispaksuus, m |
| SP | = routimiskerroin $\approx 1,09 \cdot$ segregatiopotentiaali, m^2/Kh |
| k | = routaantumiskerroin (kokeellinen, ks. kappale 3.1.8), $m/\sqrt{h^\circ C}$ |
| F | = pakkassumma, Kh |
| w_v | = tilavuusvesipitoisuus, $\%$ |

Likimääräisen kaavasta 3-49 tekee ennen kaikkea se, että routan syvyys (z_f) lasketaan siinä Stefanin yhtälöllä kokeellisella routaantumiskertoimen (k) arvolla. Kaava 3-49 voidaan ratkaista kiinnostuksen kohteesta riippuen routanousun (h) tai tiettyä routanousua vastaavan routimattoman rakenteen paksuuden (z_0) suhteen. Kaavalla voidaan myös arvioida likimääräisesti routimiskerrointa (SP) mitatun routanousun ja routan syvyyden vuorosuhteesta takaisinlaskemalla.

Segregaatiopotentiaaliteoriaa on sovellettu myös kerroksellisiin olosuhteisiin elementtimenetelmällä (esim. Jessberger & Jagow 1989) tai differenssimenetelmällä (Saarelainen 1992, Saarelainen & Kivikoski 2000), johon paneudutaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

3.2.3 SSR-malli

SSR-malli on kehitetty routanousun ja roudan syvyyden arviointiin ja sitä käytetään Suomessa mm. tierakenteen routamitoituksessa. SSR-malli pohjautuu segregaatiopotentiaaliteorian perusoletukseen (kaava 3-45). SSR-mallissa määrittelyä on kuitenkin muutettu siten, että veden virtausnopeuden sijasta käytetään virtaavan veden aiheuttamaa routanousunopeutta (dh_s/dt) (ks. kaava 3-50). Myös segregaatiopotentiaali (SP_0) on siten korvattu routimiskertoimella (SP), jonka suuruus on likimäärin 1,09-kertainen segregaatiopotentiaaliin nähden, mikä johtuu veden jäätyminen yhteydessä tapahtuvasta noin 9 % tilavuuden kasvusta. Lämpötilagradientti (G_-) määritetään SSR-mallissa routarajalla vaikuttavana arvona kaavalla 3-51.

$$\frac{dh_s}{dt} = SP \cdot G_- \quad , \text{ jossa} \quad (3-50)$$

dh_s/dt = routarintamaan ulkopuolisesta lähteestä imeytyneen veden (jäälinssin muodostumisen) aiheuttama routanousunopeus, m/h

SP = routimiskerroin $\approx 1,09 \cdot$ segregaatiopotentiaali, m^2/Kh

G_- = lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa routarajalla, K/m

$$G_- = \frac{T_-}{z_f^*} = \frac{T_f - T_p}{\lambda_{fn} \sum_{i=1}^n R_i} \quad , \text{ jossa} \quad (3-51)$$

T_- = lämpötilaero, $^{\circ}C$

T_f = huokosveden jäätyislämpötila, $^{\circ}C$

T_p = maan pinnan lämpötila, $^{\circ}C$

z_f^* = tehokas roudan syvyys, m

R_i = z_i/λ_{fi} = jäätyneen kerroksen i lämmönvastus, m^2K/W

z_i = roudan paksuus routaantuvassa kerroksessa i , m

λ_{fi} = routaantuvan kerroksen i lämmönjohtavuus jäätyneenä, W/Km

n = jäätyneiden kerrosten lukumäärä

SSR-mallin lämpötasapainoyhtälö routarajalla on muotoa:

$$dQ_- = dQ_f + (dQ_+ + dQ_g) + dQ_v \quad , \text{ eli} \quad (3-52)$$

$$\lambda_f \cdot G_- \cdot dt = q_f \cdot dz_0 + \lambda_u \cdot G_+ \cdot dt + q_{fw} \cdot \frac{dv_w}{dt} \cdot dt \quad , \text{ joissa} \quad (3-53)$$

Q_- = routarajalta ylöspäin jäätyneen kerroksen läpi virtaava lämpö, Wh/m^2

| | |
|-------------|---|
| Q_f | = jäätyvän maan ja sen sisältämän veden jäätymislämpö, Wh/m^2 |
| Q_+ | = routarajalle virtaava sulan maan jäähtymislämpö, Wh/m^2 |
| Q_g | = routarajalle virtaava geoterminen lämpö, Wh/m^2 |
| Q_v | = routarajalle sulasta maasta imeytyvän veden jäätymislämpö, Wh/m^2 |
| λ_f | = routaantuvan kerroksen lämmönjohtavuus jäätyneenä, W/Km |
| G_- | = lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa routarajalla, K/m |
| q_f | = jäätyvän kerroksen jäätymislämpö, Wh/m^3 |
| dz_0 | = jäätyneen kerrospaksuuden lisäys ajassa dt , m |
| λ_u | = sulan maan lämmönjohtavuus, W/Km |
| G_+ | = lämpötilagradientti sulassa maassa routarajan alapuolella, K/m |
| q_{fw} | = veden jäätymislämpö, Wh/m^3 |
| dv_w/dt | = veden virtausnopeus jäälinsin muodostukseen, m/h |

Sijoittamalla kaavaan 3-53 kaavat 3-45 ja 3-51, saadaan jäätyneen paksuuden lisäykselle (Δz_0) aika-askeleella Δt :

$$\Delta z_0 = \left(\frac{(T_f - T_p) \cdot \left(1 - SP_o \cdot \frac{q_{fw}}{\lambda_f} \right)}{q_f \cdot R_{fz}} - \frac{S \cdot G_+ \cdot \lambda_u}{q_f} \right) \cdot \Delta t, \text{ jossa} \quad (3-54)$$

| | |
|------------|---|
| Δz | = jäätyneen paksuuden lisäys ajassa Δt , m |
| T_f | = huokosveden jäätymislämpötila, $^{\circ}C$ |
| T_p | = maan pinnan lämpötila, $^{\circ}C$ |
| SP_o | = segregatiopotentiaali, m^2/Kh |
| S | = routarajalle virtaavan sulan maan jäähtymislämmön pakkaskauden aikaisen vaihtelun huomioonottava kokeellinen kerroin ($S=1,0$ marras-kuussa laskien $0,7$:ään huhtikuussa (Saarelainen 1992)) |
| R_{fz} | = jäätyneen rakenteen kokonaislämmönvastus, m^2K/W |

Laskennassa pakkaskausi kuvataan esimerkiksi maan pinnan kuukausikeskilämpötilalla ja aika-askeleena (Δt) käytetään lämpötilaa edustavan ajanjakson viideskymmenesosaa. Yhtälöstä 3-54 ratkaistaan kullakin aika-askeleella tapahtuva jäätyneen paksuuden lisäys (Δz_0), jolloin jäätyneen rakenteen kokonaispaksuus saadaan yhteenlaskemalla kullakin aika-askeleella tapahtuneet roudan syvyyden lisäykset. Jäätyneen paksuuden lisäystä yhtälöllä 3-54 laskettaessa on ratkaisu iteroitava, koska termi Δz_0 sisältyy yhtälössä myös jäätyneen rakenteen lämmönvastukseen (R_{fz}).

Roudan kokonaissyvyyttä laskettaessa (kaava 3-55) jäätyneen rakenteen kokonaispaksuuteen lisätään kokonaisroutanousu eli in-situ routanousun (kaava 3-48) ja routimisen aiheuttaman routanousun (kaava 3-50) summa. In-situ routanousun syntymisen edellyttää, että maaperä on veden kyllästämä. SSR-mallissa routimisen oletetaan aiheuttavan routanousua, jos jäätyvän maaperän kyllästysaste on yli 80 %. (Saarelainen 1992, Saarelainen & Kivikoski 2000)

$$z_f = \sum (\Delta z_0 + \Delta h_s + \Delta h_0) \quad , \text{ jossa} \quad (3-55)$$

z_f = roudan kokonaissyvyys, m

Δz_0 = jäätyneen paksuuden lisäys ajassa Δt , m

Δh_s = routimisen aiheuttama routanousu ajassa Δt , m (ks. kaava 104)

Δh_0 = maan sisältämän huokosveden jäätyneen aiheuttama routanousu ajassa Δt , m (ks. kaava 3-48)

SSR-mallin voidaan todeta olevan lämpötaseyhtälöltään Beskowin mallin mukainen sillä erotuksella, että SSR-mallissa huomioidaan maaperän routimisen seurauksena routarajalle virtaavan veden jäätymlämmön (Q_v) roudan syvyyttä pienentävä vaikutus. Näin ollen Beskowin malli ja SSR-malli vastaavat periaatteessa täysin toisiaan, silloin kun routaantuminen ei ulotu routivaan maahan, eli segregaatipotentiali (routimiskerroin) kaikissa tarkasteltavissa kerroksissa on nolla. Lisäksi erona on SSR-mallin differensseittäinen laskentatapa, jonka ansiosta laskelmien tarkkuus paranee, mutta toisaalta lähtötietoja tarvitaan kaikilta korkeustasoilta eli kultakin aika-askeleelta.

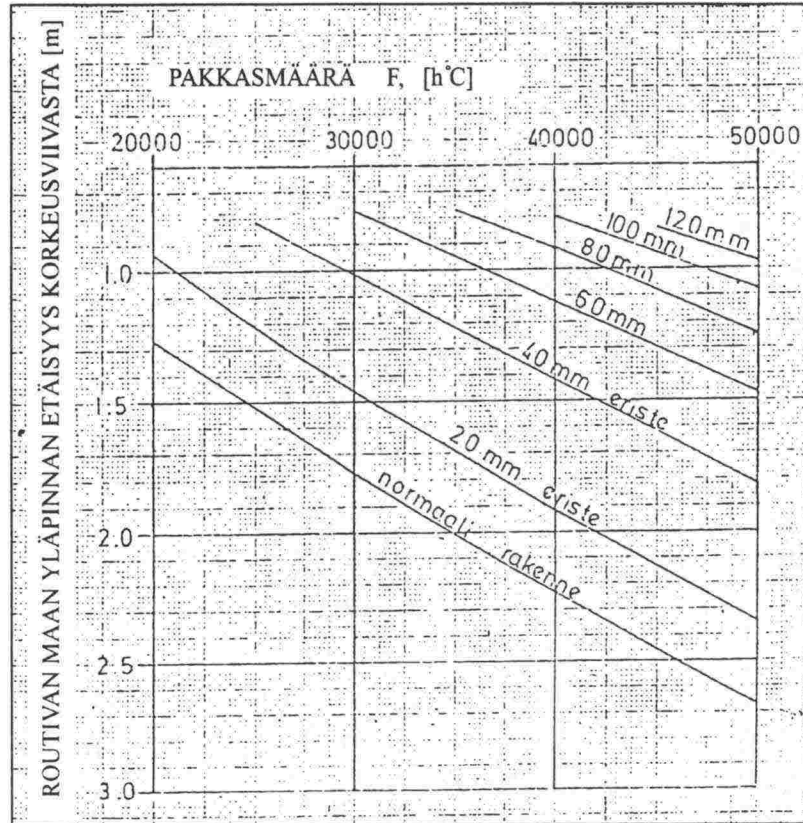
SSR-mallin mukaisessa laskennassa suurimpia virhettä aiheuttavia epävarmuustekijöitä lienee kertoimen α määrittäminen kaavaan 3-47 sekä segregaatipotentialin mittaaminen. Segregaatipotentialin luotettava määrittäminen edellyttää kenttämittauksia kohteessa, jolloin suunnittelukustannukset kasvavat väistämättä. Ainakin suuntaa-antavia arvioita segregaatipotentialista voidaan esittää, mikäli on tiedossa rakeisuudeltaan tarkasteltavaa vastaavasta materiaalista mitattuja segregaatipotentialin arvoja. Tielaitoksen routa-1d routamitoitusohjelmassa on rekisteröity mitattuja segregaatipotentialin arvoja routimistietokannaksi (Kauppi 2000).

3.3 Mitoituskäyrästäjä ratarakenteen routamitoitukseen

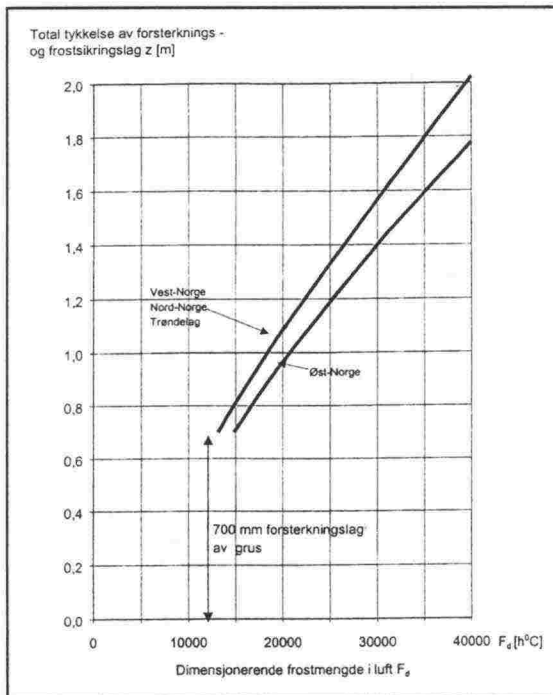
Eri lähteissä esitettyjä ratarakenteen routamitoitukseen laadittuja käyrästäjä on esitetty kuvissa 3.10 – 3.15. Käyrästäjien laadinnassa on luonnollisesti aiemmin esitetyn perusteella jouduttu tekemään joitakin yksinkertaistuksia.

Norjalaisissa käyrästäjissä tukikerrospaksuuden on oletettu olevan 0,5 m. Käyrästäjissä on kaksi eri mitoituskäyrää johtuen siitä, että maan itäosissa (sisämaassa) kesät ovat lämpimämpiä ja siten maahan varastoitunut lämpö (ja edelleen sulan maan lämpötilagradientti) suurempi kuin lähempänä rannikkoa (Jernbaneverket 1999). Pakkassumman ja vuotuisen keskilämpötilan yhteyden nojalla (ks. kappale 4.9) verrattaessa Norjassa esitettyjä käyrästäjä Suomen tilanteeseen on perustellumpaa käyttää Itä-Norjalle laadittua käyrää, joskin Suomen kesät ovat Itä-Norjaankin nähden lämpimämpiä. Tämä selittää ainakin osittain Suomessa käytössä olevalla käyrästäjällä saatavaa hieman norjalaisia käyrästäjä alhaisempaa rakennepaksuusvaatimusta.

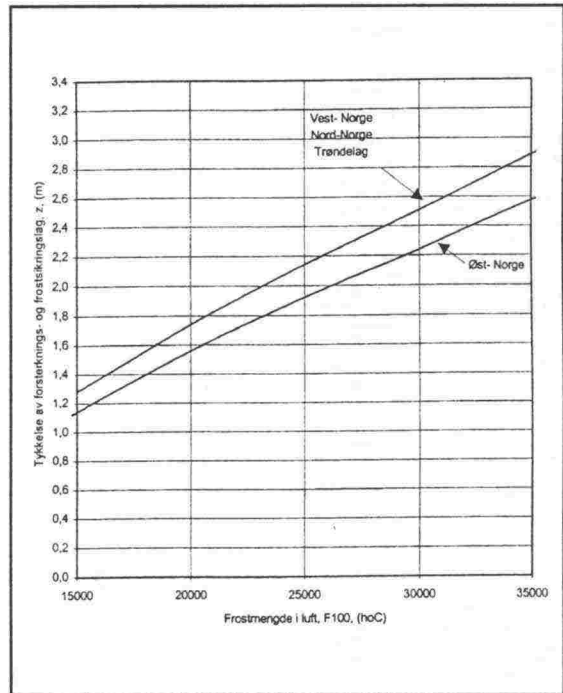
Routalevyvalmistaja Dow'n esittämällä (Dow Suomi Oy 2000) mitoituskäyrästäjällä saadaan em. kahteen mitoituskäyrästäjään nähden huomattavasti alhaisempi rakennepaksuusvaatimus eristämättömässä rakenteessa. Eristetyssä rakenteessa pienillä pakkasmäärillä rakennepaksuusvaatimus on Suomessa ja Norjassa käytössä oleviin nähden huomattavan suuri ja suurilla pakkasmäärillä huomattavan pieni.



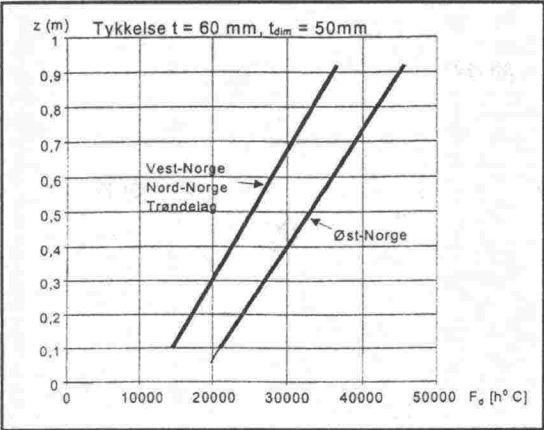
Kuva 3.10. Suomessa käytössä oleva ratarakenteen routamitoituskäyrästä.



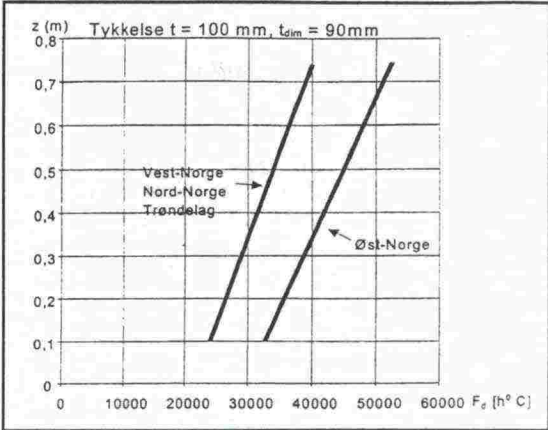
Kuva 3.11. Norjassa käytössä oleva ratarakenteen routamitoituskäyrästä eristämättömän rakenteen alusrakennepaksuudelle, kun alusrakenne on soraa. (Jernbanelverket 1999)



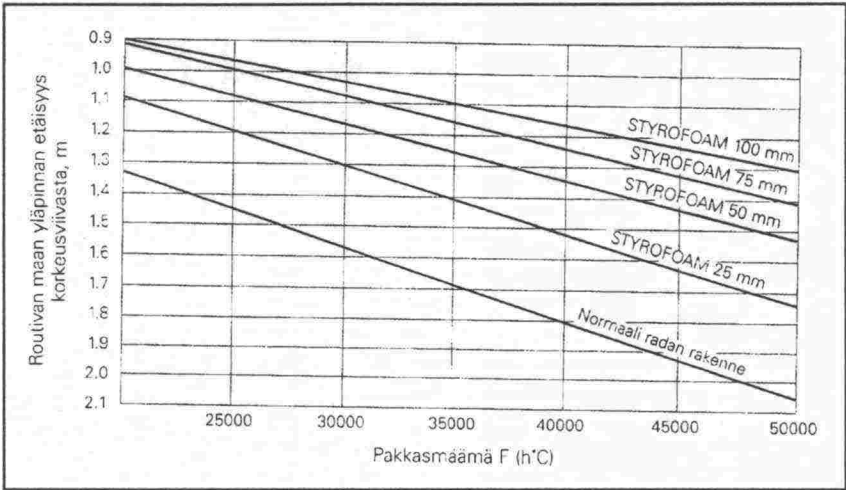
Kuva 3.12. Norjassa käytössä oleva ratarakenteen routamitoituskäyrästä eristämättömän rakenteen alusrakennepaksuudelle, kun alusrakenne on louhetta (sprengstein). (Jernbanelverket 1999)



Kuva 3.13. Norjassa käytössä oleva rata-rakenteen routamitoituskäyrästä 60 mm routalevyllä eristetyr rakenteen alusrakennepaksuudelle. Alusrakenteen oletetaan olevan soraa (Jernbaneverket 1999).



Kuva 3.14. Norjassa käytössä oleva rata-rakenteen routamitoituskäyrästä 100 mm routalevyllä eristetyr rakenteen alusrakennepaksuudelle. Alusrakenteen oletetaan olevan soraa (Jernbaneverket 1999).



Kuva 3.15. Routalevyvalmistaja Dow'n esittämä ratarakenteen routamitoituskäyrästä(Dow Suomi Oy 2000).

4. MITOITUKSEN LÄHTÖARVOISTA

4.1 Yleistä

Roudan tunkeutumiseen ratarakenteessa vaikuttaa välittömästi tai välillisesti suuri joukko eri tekijöitä, jotka voidaan jaotella ilmasto-olosuhde-, ratarakenne- ja rakenne-materiaalitekijöihin taulukon 4.1 mukaisesti.

Taulukko 4.1. Roudan tunkeutumiseen ratarakenteessa merkittävimmin vaikuttavat tekijät (Jernbaneverket 1999).

| Ilmasto-olosuhteet | Ratarakenne | Rakennemateriaalit |
|---|--------------------------|---|
| Pakkasmäärä ilmassa | Kuivatus | Kuivatiheys |
| Vuoden keskilämpötila | Rakenteen poikkileikkaus | Huokoisuus |
| Maan lämpötila | Kerrospaksuudet | Rakeisuus: - hienoainespitoisuus - d max |
| Maan pinnan lämpötila suhteessa ilman lämpötilaan | Ojakaitevuudet | Tiiviysaste |
| Edeltäneen kesän lämpötila | Leikkaussyvyys | Kosteuspitoisuus |
| Edeltäneen syksyn sadanta | Pohjamaa | Mineraalikoostumus |
| Lumi- ja tuuliolot | Viemärikaivot | Lämpötekniset ominaisuudet |
| Paikalliset ilmastovaihtelut | Alikulut | |
| Pilvisyys | Rummut | |

On selvää, että parametrien valinnalla on suuri merkitys routamitoituksen lopputulokseen. Taulukosta 4.1 voidaan todeta, että jotkut tekijöistä ovat määritettävissä, jotkut vaihtelevat merkittävästi radan eri kohdissa, jotkut vaihtelevat merkittävästi vuosittain ja jotkut riippuvat radan kunnossapidosta. Tällöin on järkevää valita tietyt, vain vähän vaihtelevat tai vähäisen merkityksen omaavat tekijät routaantumistarkasteluissa vakioksi ja selvittää ne tekijät, joiden vaihtelevuus suhteessa niiden merkittävyyteen on niin huomattava, että ne tulee tapauskohtaisesti määrätä.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan edellä kappaleessa 3.1 esitetyissä roudan syvyyden laskentamenetelmissä tarvittavia lähtötietoja, maan lämpötekniisiä ominaisuuksia eli jäätymislämpöä, lämpökapasiteettia ja lämmönjohtavuutta, XPS-routalevyn lämmönjohtavuutta ja maaperän lämpötilagradienttia sekä niiden arvioinnissa tarvittavia ratarakennemateriaalien kosteuspitoisuuksia ja kuivatiheyksiä. Lopuksi tarkastellaan maan routivuuden määrittelyä ja ilmasto-olosuhdetekijöitä. Kappaleen 3.1 laskentamenetelmistä voidaan todeta, että niissä laskettavaan roudan syvyyteen ei taulukon 4.1 ratarakennetekijöillä ole välitöntä vaikutusta lukuun ottamatta mitoitettavia kerrospaksuuksia.

4.2 Maaperän jäätymislämpö

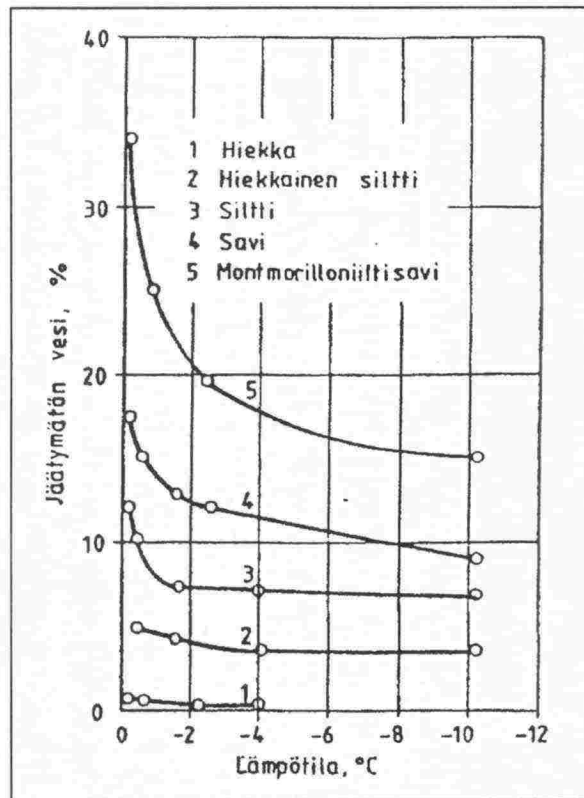
Olomuodon muutoslämmöllä (latenttilämmöllä) tarkoitetaan olomuodonmuutoksessa vapautuvaa tai sitoutuvaa tilavuus- tai massayksikköä kohden laskettua lämpömäärää. Jäätymislämpö kuvastaa siten aineen jäätymisen yhteydessä vapautuvaa lämpömäärää. Kun maaperän jäätymislämmön oletetaan muodostuvan ainoastaan sen sisältämän

veden jäätymislämmöstä, voidaan maaperän jäätymislämpö tilavuusyksikköä kohti laskea kaavalla 4-1.

$$q_f = w \cdot \rho_d \cdot L_w \quad , \text{ jossa} \quad (4-1)$$

- q_f = maaperän (tilavuus)jäätymislämpö, Wh/m^3
 w = maan vesipitoisuus paino-osina
 ρ_d = maan kuivatiheys, kg/m^3
 L_w = veden jäätymislämpö, $\approx 93 Wh/kg$

Kaava 4-1 pätee, jos kaikki maaperän sisältämä vesi jäätyy $0^\circ C$:ssa. Etenkin hienorakeiset maalajit sisältävät jäätymätöntä vettä vielä pakkaslämpötiloissakin. Ilmiön vaikutus tulee tarkoissa jäätymislämpölaskelmissa huomioda vähentämällä vesipitoisuudesta kaavassa 4-1 jäätymättömän veden osuus. Kuvasta 4.1 nähdään, kuinka jäätymättömän veden osuus alle $0^\circ C$ lämpötilassa pienenee maalajin karkeistuessi ja on hiekassa enää alle 1 %. Niinpä ratarakenteissa kysymykseen tulevissa materiaaleissa voidaan kaiken materiaalien sisältämän veden olettaa jäätyvän $0^\circ C$:ssa.



Kuva 4.1. Jäätymätön vesi lämpötilan suhteen eri materiaaleilla (Helander 1986).

4.3 Pohjamaan ja rakennekerrosten lämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetilla tarkoitetaan energiamäärää, joka tarvitaan nostamaan yhden massa- tai tilavuusyksikön suuruisen ainemäärän lämpötilaa yhden asteen verran, tai vastaavasti energiamäärää, joka vapautuu vastaavan ainemäärän lämpötilan laskiessa yhden asteen

verran. Massayksiköistä puhuttaessa käytetään nimitystä ominaislämpö tai ominaislämpökapasiteetti ja tilavuusyksiköistä puhuttaessa nimitystä tilavuuslämpökapasiteetti. Ominaislämpökapasiteetilla tarkoitetaan tilavuuslämpökapasiteettia jaettuna materiaalin tiheydellä. Jatkossa puhuttaessa lämpökapasiteetista tarkoitetaan tilavuuslämpökapasiteettia.

Maan lämpökapasiteetti on tilavuusyksikön sisältämän maa-aineksen, huokosveden, huokosjään sekä huokosilman lämpökapasiteettien summa. (Saarelainen 1990, Kujala 1994). Näin ollen maan lämpökapasiteetille saadaan:

$$C = \rho_d \cdot c_m + n_w \cdot \rho_w \cdot c_w + n_j \cdot \rho_j \cdot c_j + n_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad , \text{ jossa} \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} C &= \text{maan tilavuuslämpökapasiteetti, } Wh/m^3K \\ \rho_d &= \text{maan kuivatiheys, } kg/m^3 \\ c_m &= \text{mineraaliaineksen ominaislämpökapasiteetti, } Wh/kgK \\ n_w \cdot \rho_w &= \text{maaperän vesipitoisuus, } kg/m^3 \\ c_w &= \text{veden ominaislämpökapasiteetti, } Wh/kgK \\ n_j \cdot \rho_j &= \text{maaperän jääpitoisuus, } kg/m^3 \\ c_j &= \text{jään ominaislämpökapasiteetti, } Wh/kgK \\ n_i \cdot \rho_i &= \text{maaperän ilmapitoisuus, } kg/m^3 \\ c_i &= \text{ilman ominaislämpökapasiteetti, } Wh/kgK \end{aligned}$$

Koska huokosilman massa on vähäinen, voidaan käytännön tarkasteluissa huokosilman lämpökapasiteetin vaikutus jättää huomioimatta. Kun lisäksi huomioidaan, että veden ominaislämpökapasiteetti $c_w = 1,16 \text{ Wh/kgK}$ ja jään ominaislämpökapasiteetti $c_j = 0,58 \text{ Wh/kgK}$, voidaan sulan ja jäätyneen maan lämpökapasiteetit laskea kaavoilla 4-3 ja 4-4 (Andersland & Anderson 1978, Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1997).

$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \left(0,18 + 1,0 \frac{w}{100} \right) \cdot C_w \quad (4-3)$$

$$C_f = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \left(0,18 + 0,5 \frac{w}{100} \right) \cdot C_w \quad , \text{ joissa} \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} C_u &= \text{sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, } Wh/m^3K \\ C_f &= \text{jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, } Wh/m^3K \\ \rho_d &= \text{maan kuivatiheys, } kg/m^3 \\ \rho_w &= \text{veden tiheys, } kg/m^3 \\ w &= \text{maaperän vesipitoisuus, paino-\%} \\ C_w &= \text{veden tilavuuslämpökapasiteetti, } \approx 1163 \text{ Wh/m}^3K \end{aligned}$$

4.4 Rakennemateriaalien lämmönjohtavuus

4.4.1 Yleistä

Aineen lämmönjohtavuus on fysikaalinen ominaisuus, joka kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuudella tarkoitetaan lämpövuon ja lämpötilagradientin suhdetta (ks. Fourierin laki kappale 2.2.2). Maan lämmönjohtavuus riippuu useista eri ominaisuuksista, joista tärkeimpiä ovat lämpötila, kosteuspitoisuus, tiiviys, raekoostumus, mineraloginen koostumus ja kyllästystila (Kujala 1994).

Rakennekerrosten lämmönjohtavuus riippuu suurelta osin käytetyistä materiaaleista mutta myös esimerkiksi kuivatuksen toimivuudesta, sillä tietyn materiaalin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa eniten kosteuspitoisuus. Kosteuspitoisuuden kasvaessa lämmönjohtavuus kasvaa. Tämä vaikutus korostuu alhaisissa lämpötiloissa, koska jään (-4 °C) lämmönjohtavuus $\lambda_j = 2,1\text{ W/Km}$ on huomattavasti suurempi kuin veden lämmönjohtavuus $\lambda_w = 0,60\text{ W/Km}$.

Lämmönjohtavuus kasvaa myös tiivistysasteen kasvaessa, mitä selittää löyhän maan sisältämän huokosilman alhainen lämmönjohtavuus $\lambda_i = 0,026\text{ W/Km}$. Kerrospaksuuteen nähden suuri yksittäisten rakeiden koko on myös lämmönjohtavuutta suurentava tekijä, koska kiven lämmönjohtavuus on suuri suhteessa maa-aineksen keskimääräiseen lämmönjohtavuuteen. Tällöin korostuu myös mineraalikoostumuksen merkitys. Huomioitavaa on erityisesti kvartsin suuri lämmönjohtavuus, joka on noin 10 W/Km , kun taas esimerkiksi maasälvän ja kiilteiden lämmönjohtavuus on noin 2 W/Km (Johansen et al. 1976).

Johtumalla tapahtuvan lämmön siirtymisen lisäksi lämmön siirtymistä voi tietyillä rakeisuuksilla ja kyllästysasteilla tapahtua konvektiona tai säteilemällä (ks. kappale 2.2.2). Norjassa on tutkittu (Jerbaneverket 1999) konvektion merkitystä karkearakeisissa, rautateissä käytettävissä materiaaleissa mittaamalla lämmön siirtymistä olosuhteissa, joissa konvektio ei ole mahdollinen sekä konvektiolle suotuisissa oloissa. Tutkimuksen perusteella 20 °C/m tai sitä suuremmalla lämpötilagradientilla tasarakeisessa raekooltaan 25-63 mm kuivassa sepelissä tapahtuvasta konvektiosta seuraa 50-70 % lisäys materiaalissa tapahtuvaan lämmön siirtymiseen verrattuna materiaalin lämmönjohtavuuteen (eli lämmön siirtymiseen ilman konvektiota). Sekarakeisessa raekooltaan 0-250 mm louheessa (sprengstein) konvektion vaikutus todettiin pienemmäksi. Siten sekarakeisten materiaalien käyttö arvioitiin mielekkääksi, koska mitoitusten menetelmässä lämmön johtuminen oletetaan ensisijaiseksi lämmön siirtymismekanisminä, eikä konvektion huomioimiseksi ole kehitetty menetelmää (Jerbaneverket 1999). Tasarakeisessa sepelissä tehtyjen havaintojen vaikutuksia arvioitaessa on syytä muistaa, että raidesepeli sisältää jo rataa asennettaessa jonkin verran hienorakeista ainesta, jonka osuus kasvaa jauhautumisen seurauksena (Nurmikolu 2000) laajentaen siten tukikerroksen rakeisuusaluetta ja heikentäen konvektiolle suotuisia olosuhteita.

4.4.2 Maan lämmönjohtavuuden määrittämisestä

Maan lämmönjohtavuutta voidaan arvioida kokeellisten mallien mukaan tai se voidaan määrittää laboratorio- tai kenttämittauksin. Lämmönjohtavuuden määrittämiseksi on esitetty useita empiirisiä yhtälöitä, joista tunnetuimmat ovat Kerstenin esittämä sekä Johansenin siitä kehittämä menetelmä. Lisäksi käytetään De Vriesin menetelmää, jossa tarkastelut pohjautuvat maan eri olomuotojen tilavuusosuuksien sekä niiden lämmönjohtavuuksien huomioon ottamiseen (Kujala 1994).

Kerstenin empiiristen tutkimusten perusteella hienorakeisen maan (savi, siltti) lämmönjohtavuus määritetään jäätyneenä yhtälöllä 4-5 ja sulana yhtälöllä 4-6. Vastaavasti karkearakeisen maan lämmönjohtavuus määritetään jäätyneenä yhtälöllä 4-7 ja sulana yhtälöllä 4-8. Maalajiominaisuuksina Kerstenin yhtälöissä on maan kuivairtitiheys (ρ_d) ja vesipitoisuus (w). (Hentilä et al. 1995, Saarelainen 1992, Andersland & Anderson 1978)

$$\lambda_f = 0,0014 \cdot 10^{1,4 \cdot \rho_d} + 0,012 \cdot 10^{0,50 \cdot \rho_d} \cdot w \quad (4-5)$$

$$\lambda_u = (0,13 \cdot \log_{10} w - 0,029) \cdot 10^{0,62 \cdot \rho_d} \quad , \text{ joissa} \quad (4-6)$$

λ_f = jäätyneen *hienorakeisen* maan lämmönjohtavuus, W/Km

λ_u = sulan *hienorakeisen* maan lämmönjohtavuus, W/Km

ρ_d = maan kuivairtitiheys, t/m³

w = maan vesipitoisuus, paino-%

$$\lambda_f = 0,011 \cdot 10^{0,81 \cdot \rho_d} + 0,0046 \cdot 10^{0,91 \cdot \rho_d} \cdot w \quad (4-7)$$

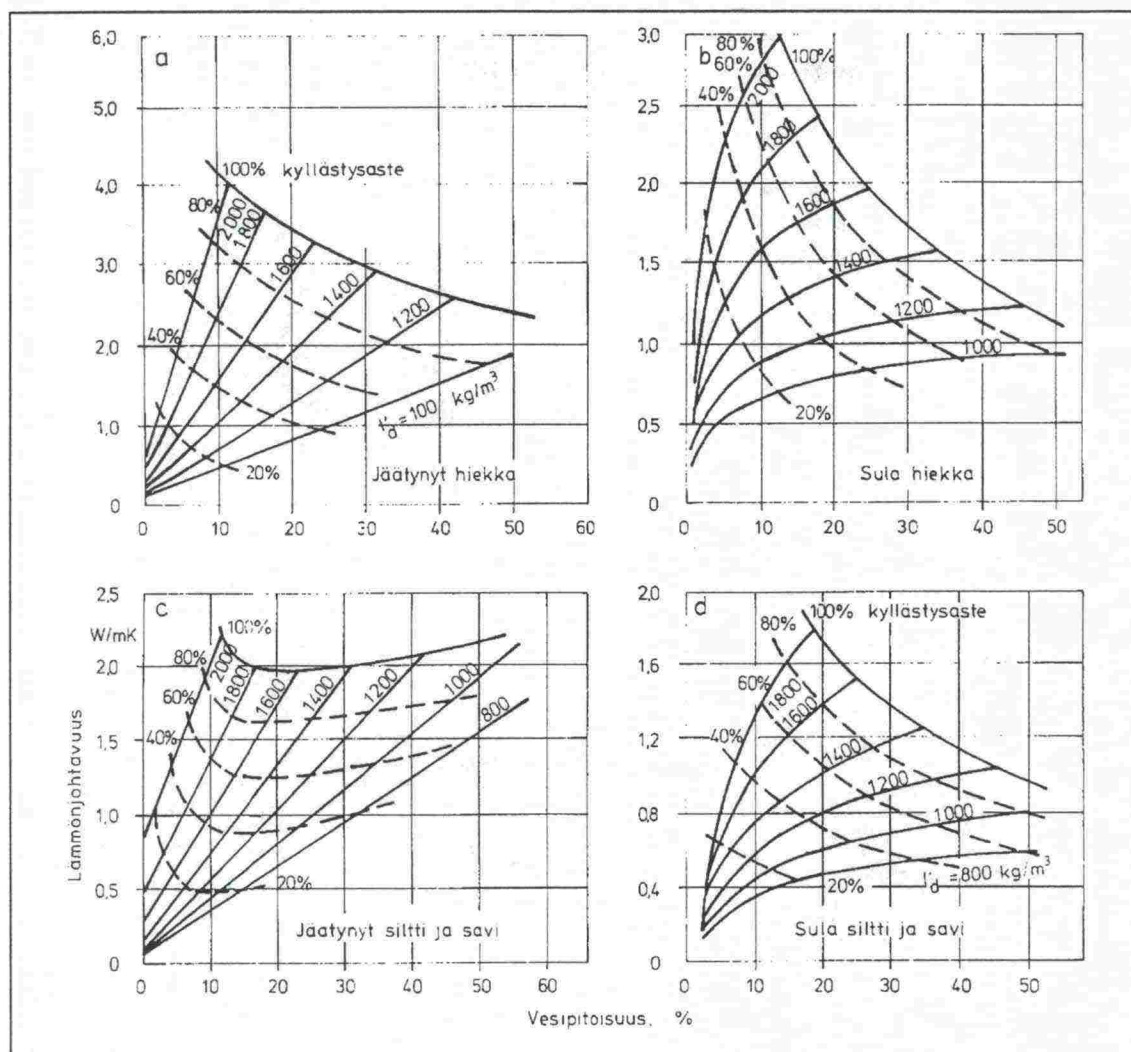
$$\lambda_u = (0,10 \cdot \log_{10} w + 0,058) \cdot 10^{0,62 \cdot \rho_d} \quad , \text{ joissa} \quad (4-8)$$

λ_f = jäätyneen *karkearakeisen* maan lämmönjohtavuus, W/Km

λ_u = sulan *karkearakeisen* maan lämmönjohtavuus, W/Km

Kuvassa 4.2 on esitetty graafisesti lähinnä Kerstenin työn pohjalta määritetyt eri maalajien keskimääräiset lämmönjohtavuudet maan kuivairtitiheyden, vesipitoisuuden ja kyllästysasteen suhteen (Andersland & Anderson 1978).

Johansenin esittämät yhtälöt lämmönjohtavuuden laskemiseksi (Johansen et al. 1976) perustuvat pääasiassa Kerstenin yhtälöihin. Johansenin laskentamallissa huomioidaan kuivatiheyden ja kyllästysasteen lisäksi kvartsipitoisuus maalajissa. Tämä on oleellista siksi, että kvartsin lämmönjohtavuus on huomattavan suuri suhteessa muihin mineraaleihin. Johansenin menetelmän käyttämistä rajoittaa mineraalikoostumuksen määrittämisen hankaluus etenkin karkearakeisissa maalajeissa. Johansenin esittämästä maan lämmönjohtavuuden laskentamenetelmästä tarkemmin lähteissä (Johansen et al. 1976, Helander 1986, Aittomäki 1986).



Kuva 4.2. Maan lämmönjohtavuuden määrittäminen jäätyneenä ja sulana Kerstenin tutkimusten perusteella. Yhtälöihin 4-5 – 4-8 verrattuna maalajiominaisuutena on lisäksi maan kyllästysaste. a) jäätynyt hiekka, b) sula hiekka, c) jäätynyt siltti ja savi, d) sula siltti ja savi. (Andersland & Anderson 1978)

4.4.3 Taulukoituja arvoja maamateriaalien lämmönjohtavuudelle

Tämän kappaleen taulukoissa tarkastellaan kirjallisuudessa esitettyjä lämmönjohtavuuksia ratarakenteissa kyseeseen tuleville maamateriaaleille, eli kalliomurskeelle, soralle ja hiekalle.

Maan lämmönjohtavuus riippuu voimakkaasti vesipitoisuudesta, kuten taulukosta 4.2 nähdään. Taulukosta nähdään myös, että Watzingerin ja Kerstenin mukaan määritetyt lämmönjohtavuudet eivät korreloi keskenään (Skaven-Haug 1971). Kerstenin mukaan määritetty lämmönjohtavuus on selvästi suurempi kuin Watzingerin mukaan määritetty lämmönjohtavuus. Laskettaessa lämmönjohtavuus kaavoilla 4-5 – 4-8 saadaan vielä suurempia arvoja kuin taulukossa 4.2 Kerstenin määrittäminä esitetyt.

Skaven-Haugin (1971) mukaan ratarakennemateriaalien lämmönjohtavuus on pienempi kuin tierakennemateriaalien johtuen tierakenteen materiaalien suuremmasta tiivyydestä ja kuivatiheydestä. Skaven-Haug esittää ratarakenteen materiaalien jäätyneen lämmön-

johtavuuden ylärajaksi eli mitoitusarvoksi soveltuvaksi, raidesepelille $\lambda = 1,15 \text{ W/Km}$ ja hiekkaiselle soralle (13 p.% vesipitoisuudella) $\lambda = 1,75 \text{ W/Km}$.

Taulukko 4.2. Maalajien lämmönjohtavuusarvon riippuvuus kuivatiheydestä ja vesipitoisuudesta Watzingerin ja Kerstenin mukaan (Skaven-Haug 1971).

| Materiaali | ρ_d t/m ³ | w p. % | λ_{sula} (W/Km) | | $\lambda_{jäätynyt}$ (W/Km) | |
|------------------|------------------------------|-----------|-------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| | | | Watzinger | Kersten | Watzinger | Kersten |
| Raidesepeli | 1,4 | 4-12 | (0,4)-0,7 | 0,8-1,2 | 0,6-0,8 | 0,5-1,0 |
| Sora, hiekkainen | 1,75 | 8-13 | 0,9-1,2 | 1,5-1,9 | 0,7-0,9 | 1,2-1,7 |
| Hiekka | 1,75 | 10-20 | 0,8-1,2 | 1,6-2,1 | 0,8-1,5 | 1,4-2,3 |
| Murske, gradert | 2,0 | 5-15 | 0,8-1,4 | 1,9-2,6 | 0,7-1,5 | 1,3-2,8 |

Neuvostoliittolaisen normin (SNiP II-18-76 1985) mukaan maan lämmönjohtavuus määritellään kuivatiheyden ja vesipitoisuuden perusteella taulukosta 4.3.

Taulukko 4.3. Maan lämmönjohtavuus kuivatiheyden ja vesipitoisuuden suhteen (SNiP II-18-76 1985)

| ρ_d t/m ³ | w p-% | Lämmönjohtavuus W/Km | | | |
|---------------------------|-------|----------------------|----------|--------------|----------|
| | | Hiekka | | Hieno hiekka | |
| | | Sula | Jäätynyt | Sula | Jäätynyt |
| 1,4 | 35 | - | - | 1,80 | 1,86 |
| 1,4 | 30 | - | - | 1,74 | 1,80 |
| 1,4 | 25 | 1,92 | 2,15 | 1,57 | 1,69 |
| 1,4 | 20 | 1,57 | 1,86 | 1,34 | 1,51 |
| 1,4 | 15 | 1,40 | 1,63 | 1,10 | 1,28 |
| 1,4 | 10 | 1,10 | 1,28 | 0,93 | 1,05 |
| 1,4 | 5 | 0,76 | 0,81 | 0,64 | 0,70 |
| 1,6 | 30 | - | - | 1,86 | 1,98 |
| 1,6 | 25 | 2,50 | 2,73 | 0,64 | 0,76 |
| 1,6 | 20 | 2,15 | 2,38 | 1,63 | 1,74 |
| 1,6 | 15 | 1,80 | 2,04 | 1,45 | 1,57 |
| 1,6 | 10 | 1,45 | 1,63 | 1,16 | 1,28 |
| 1,6 | 5 | 1,05 | 1,10 | 0,81 | 0,87 |
| 1,8 | 20 | 2,67 | 2,85 | 1,86 | 1,98 |
| 1,8 | 15 | 2,27 | 2,62 | 1,69 | 1,80 |
| 1,8 | 10 | 1,98 | 2,21 | 1,45 | 1,57 |
| 1,8 | 5 | 1,45 | 1,51 | 0,99 | 0,99 |
| 2,0 | 10 | 2,73 | 2,91 | 1,74 | 1,86 |
| 2,0 | 5 | 2,09 | 2,15 | - | - |

Johansenin esittämällä menetelmällä lasketut tierakenteen routasuojaukseen soveltuvien routimattomien maamateriaalien lämmönjohtavuudet voidaan yleistettynä esittää taulukon 4.4 mukaisesti (Johansen et al. 1976, Nordal & Refsdal 1989).

Taulukko 4.4. Tierakenteen routasuojaukseen soveltuvien maamateriaalien kuivatiheys, vesipitoisuus, kyllästysaste sekä yleistetty Johansenin menetelmällä laskettu lämmönjohtavuus sulana ja jäätyneenä. Lämmönjohtavuudelle asetettu vaihteluväli edustaa kertymäfunktion 10 % ja 90 % vastaavia lämmönjohtavuuden arvoja, mistä syystä joissakin ääritapauksissa lämmönjohtavuus saattaa poiketa huomattavastikin taulukossa esitetyistä. (Johansen et al. 1976, Nordal & Refsdal 1989).

| Materiaali | $\rho_d \text{ t/m}^3$ | $w \text{ p.}\%$ | $S_r \%$ | $\lambda_u \text{ W/Km}$ | $\lambda_f \text{ W/Km}$ |
|---------------------------|------------------------|------------------|----------|--------------------------|--------------------------|
| Kalliomurske (karkearak.) | 1,5-2,1 | 1-4 | 10-30 | 0,7-1,5 | 0,6-1,3 |
| Sora | 1,8-2,1 | 2-6 | 15-40 | 1,0-2,0 | 0,7-1,8 |
| Hiekka | 1,7-2,0 | 4-12 | 20-60 | 1,1-2,2 | 0,8-1,8 |
| Hiekkatäyte | 1,8-2,1 | 3-7 | 20-40 | 1,0-2,0 | 0,9-1,8 |
| Hiekka pvp:n alapuolella | 1,7-2,1 | 10-18 | 85-100 | 1,5-2,7 | 2,4-4,2 |

Norjan rautateiden uudehkossa ohjeessa (Jernbaneverket 1999) esitetään ratarakenteen maamateriaaleille taulukon 4.5 mukaisia suuntaa-antavia kuivatiheys-, vesipitoisuus- ja lämmönjohtavuusarvoja routamitoituksessa käytettäväksi.

Taulukko 4.5. Ratarakenteessa käytettävien maamateriaalien suuntaa-antavia kuivatiheys-, vesipitoisuus- ja lämmönjohtavuusarvoja pohjavedenpinnan yläpuolella (Jernbaneverket 1999).

| Materiaali | $\rho_d \text{ t/m}^3$ | $w \text{ p.}\%$ | $\lambda \text{ W/Km}$ |
|------------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| Raidesepeli | 1,5 | 2-4 | 0,8-1,1 |
| Sora / hiekkainen sora | 1,8 | 2-8 | 0,7-2,0 |
| Hiekka | 1,6 | 4-12 | 0,8-2,2 |
| Louhe | | 0,5-2 (tasarak.) | 0,6-2,0 |
| | | 1-4 (sekarak.) | |

Verrattaessa taulukoituja lämmönjohtavuuden arvoja Kerstenin yhtälöillä (4-5–4-8) laskettuun lämmönjohtavuuteen voidaan todeta, että Kerstenin yhtälöillä saadaan jäätyneessä maassa suurilla kosteuspitoisuuksilla tai kuivatiheyksillä huomattavasti taulukoissa esitettyjä suurempia lämmönjohtavuuden arvoja.

Taulukosta 4.5, kuten muistakin taulukoista nähdään, että maalajeille yleistettyjen lämmönjohtavuuksien vaihteluvälit ovat varsin suuret, mikä osoittaa, että parametrien valintaan on kiinnitettävä suurta huomiota. Maamateriaalin mitoittavaa lämmönjohtavuutta valittaessa tulisi tuntee tai riittävällä tarkkuudella pystyä arvioimaan maalajin lisäksi ainakin materiaalin kosteuspitoisuus (ks. kappale 4.6) ja kuivatiheys (ks. kappale 4.7), jotta päästäisiin edes jonkinlaiseen tarkkuuteen.

4.4.4 XPS-routalevyn lämmönjohtavuus

XPS-routalevyjen käyttö perustuu maamateriaaleihin verrattuna levyn alhaiseen lämmönjohtavuuteen ja sen säilymiseen alhaisena levyyn radassa kohdistuvien rasitusten alaisena.

Uuden XPS-routalevyn lämmönjohtavuus kasvoi levyn valmistusmenetelmän muutoksen myötä, kun ponnekaasuna siirryttiin ilmakehän otsonikerrosta tuhoavasta CFC-kaasusta käyttämään HCFC-välivaiheen kautta hiilidioksidia. Hiilidioksidin lämmönjohtavuus on huomattavasti CFC-kaasua suurempi. Lisäksi hiilidioksidi poistuu levyn solukosta nopeasti samalla, kun sitä suuremman lämmönjohtavuuden omaavan ilman tyyppi ja happi täyttävät solut, kun taas CFC-kaasun poistuminen kestää levyn paksuudesta riippuen kymmeniä vuosia lämmönjohtavuuden säilyessä näin ollen alhaisena varsin pitkään. Raskasmolekyylikaasulla paisutetun levyn lämmönjohtavuus kuivana +10 °C lämpötilassa oli 0,027 W/Km luokkaa, ja hiilidioksidilla paisutetulla levyllä vastaavasti 0,036 W/Km luokkaa. (Nurmikolu & Kolisoja 2001a).

Eniten nykyisten hiilidioksidilla paisutettujen levyjen lämmönjohtavuutta ratarakenteessa lisäävä tekijä on levyihin imeytyvä kosteus, sillä solukaasun vaihtumisesta johtuva ns. vanheneminen on CO₂-kaasulla paisutetuissa levyissä vähäistä ja tapahtuu CFC-kaasulla paisutettuihin levyihin verrattuna huomattavan nopeasti, noin kuukauden kuluessa levyn valmistuksesta. Kosteuden imeytymistä XPS-routalevyyn on selvitelty lähemmin aiemmassa tutkimuksessa (Nurmikolu & Kolisoja 2001a), jonka perusteella XPS-routalevyn lämmönjohtavuuden kannalta mitoittavaksi kosteuspitoisuudeksi arvioitiin ratarakenteessa 10-12 til.%.

XPS-routalevyn kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden yhteyttä on aiemmin tarkasteltu lineaarisena, jolloin kostean levyn lämmönjohtavuus voidaan esittää muodossa:

$$\lambda_m = \lambda_k + k \cdot w \quad , \text{ jossa} \quad (4-9)$$

λ_m = kostean levyn lämmönjohtavuus, W/Km

λ_k = kuivan levyn lämmönjohtavuus, W/Km

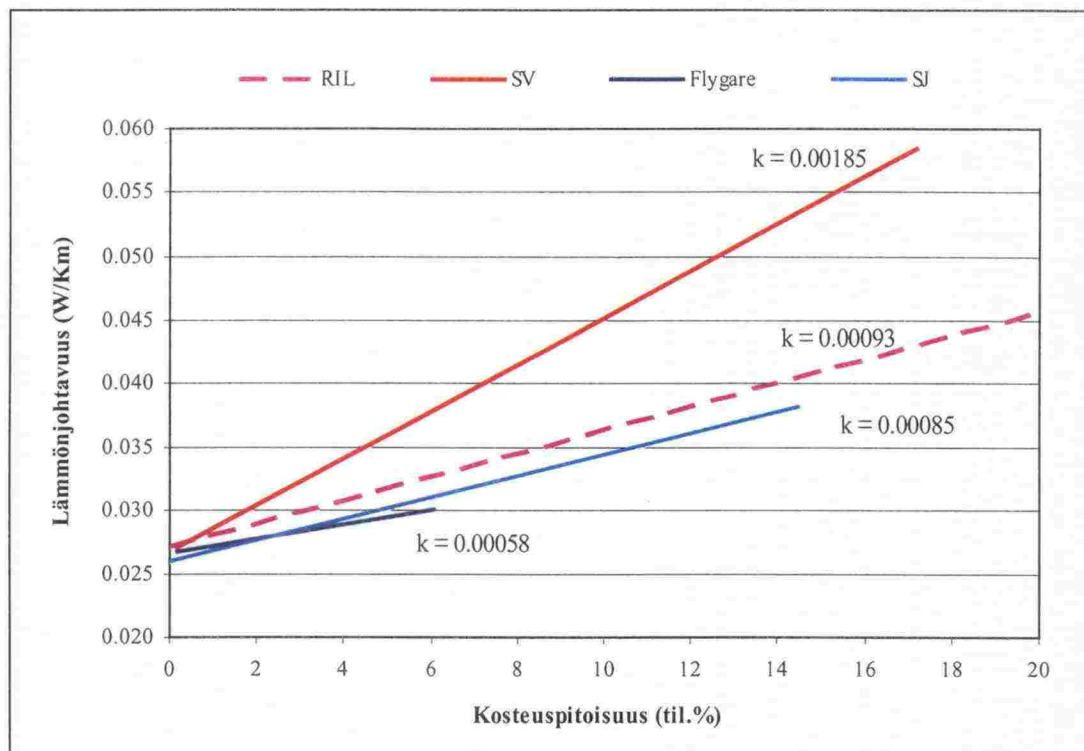
k = levyn kosteuspitoisuuden vaikutusta lämmönjohtavuuteen kuvaava kerroin

w = levyn kosteuspitoisuus, til. %

Kuvassa 4.3 on esitetty eri lähteissä esitettyjen kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden yhteyksien välille piirretyt lineaarisiksi oletetut trendiviivat. Kuvassa näkyy myös yhteyden mukainen kertoimen k arvo kaavassa 4-9. Kuten kuvasta on nähtävissä, kosteuspitoisuuden vaikutusta XPS-levyn lämmönjohtavuuteen kuvaavissa kertoimissa (k) on suurta hajontaa. On myös huomattava, että mittaukset on tehty raskasmolekyylikaasuilla paisutetuille levyille, minkä johdosta korrelaatiosta ekstrapoloimalla saatavan kuivan levyn lämmönjohtavuus on huomattavan alhainen verrattuna nykyisten hiilidioksidilla paisutettavien levyjen lämmönjohtavuuksiin.

Nykyisten XPS-levyjen mitoituslämmönjohtavuutta on kuvan 4.3 perusteella vaikea arvioida. Niinpä kosteuspitoisuuden yhteyttä XPS-levyn lämmönjohtavuuteen päätettiin selvittää kokeellisesti mittaamalla lämmönjohtavuus eri kosteuspitoisuuksiin saatetuista levyistä. Pyrkimyksenä oli ratarakenteen routamitoituksessa käytettäväksi soveltuvan XPS-routalevyn mitoituslämmönjohtavuuden arvioiminen.

Tutkittavaksi valittiin saksalaisen BASF AG:n vuonna 1999 VR-Rata Oy:lle toimittama nimellispaksuudeltaan 80 mm levy, joka oli tyyppiltään Styrodur C-RHS, eli hiilidioksidilla paisutettu. Kyseisestä levystä oli aiemman tutkimuksen yhteydessä syksyllä 2000 mitattu +10 °C keskilämpötilassa lämmönjohtavuus 0,0365 W/Km.



Kuva 4.3. Regressiosuorat eri lähteissä esitetyille XPS-levyn kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden yhteyksille. Kuvassa esitettyjen lyhenteiden merkitys on selvitetty alla.

SJ - Ruotsin rautateiltä otetut näytteet 1970-77 (Sandegren 1977).

Flygare- Flygare et al. (1989) esittämät mittaustulokset

SV - Ruotsin teistä v. 1968-88 otetut näytteet, joista suurin osa tyypiltään Styrofoam HI 50 (Jonsson 1993)

RIL - RIL:n käsikirjassa (Lattu & Welin 1979) esitetty arvo, kun $w < 20$ til.%

Tarkoituksena oli saattaa levystä sahatut näytekappaleet keinotekoisesti laboratoriossa eri kosteuspitoisuuksiin. Aluksi kosteutta pyrittiin imeyttämään veteen upotettuihin koekappaleisiin sekä paineen että alipaineen avulla. Veden imeytyminen levyyn oli mainituissa menettelyissä varsin vähäistä ja olikin selvää, että tavoiteltuihin kosteuspitoisuuksiin ei näillä keinoin ole mahdollista päästä, vaikka olosuhteita ylläpidettäisiin kuukausia. Tilavuusosina ilmaistuna vesipitoisuus kasvoi koekappaleen ohentuessa. Havaintojen perusteella tarkastellun Styrodur-levyn voidaan todeta olevan suhteellisen läpäisemätön nestemäiselle vedelle.

Nestemäisen veden heikon tunkeutumisen johdosta imeyttämistä varten rakennettiin laitteisto, jossa aikaansaatiin voimakas vesihöyryn diffuusio. Diffuusiolle suotuisat olosuhteet rakennettiin isoon, sisämitoiltaan 900 mm x 1100 mm olevaan, muovikonttiin. Kontin pohjalla kiersi noin +80 °C vesi. Vesipinnan yläpuolelle jätettiin noin 100 mm ilmatila ennen kontin pohjaan tuettua teräsrilää. Kooltaan 300 mm x 300 mm näytekappaleet, jotka oli sahattu kokonaistilavuusvesipitoisuuden lisäämiseksi kahdeksaan paksuudeltaan noin 8-9 mm viipaleeseen, aseteltiin viere viereen ritilän päälle ja ritilästä näkyviin jäänyt osa tilkittiin ylijäämäkappaleilla. Näytteiden päälle asetettiin painoksi teräsrilä ja sen yläpuolelle kumimatto. Yläpuolella vallitsi normaali laboratoriolämpötila, noin +20 °C.

Järjestelyt toimivat odotetusti. Viipaloituihin näytekappaleisiin kerääntyi kosteutta keskimäärin noin 3-4 til.% vuorokaudessa. Menetelmä perustuu vesihöyryn diffuusioon, jossa vesihöyry siirtyy (diffusoituu) pienemmän vesihöyryn osapaineen suuntaan osapaine-eron suuruudesta riippuvalla nopeudella pyrkien tasoittamaan osapaine-eron. Vesipinnan ja näytelevyjen välisessä tyhjätilassa noin + 80 °C lämpötilassa vesihöyryn osapaine vastasi kylläisen vesihöyryn painetta kyseisessä lämpötilassa. Vesihöyryn osapaine ei voi olla kylläisen vesihöyryn painetta suurempi, sillä saavutettaessa kyllästyspaine vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi. Kylläisen vesihöyryn paine riippuu lämpötilasta pienentyen lämpötilan laskiessa. Niinpä näytekappaleet sijaitsivat vesihöyryn ”osapaine-erokentässä”, jossa levyn alapuolella vallitseva vesihöyryn osapaine vastasi kylläisen vesihöyryn painetta +80 °C lämpötilassa, eli noin 47.000 kPa, ja levyn yläpuolella vallitseva vesihöyryn osapaine oli enintään +20 °C lämpötilassa vallitsevan kylläisen vesihöyryn paineen, eli noin 2.400 kPa suuruinen.

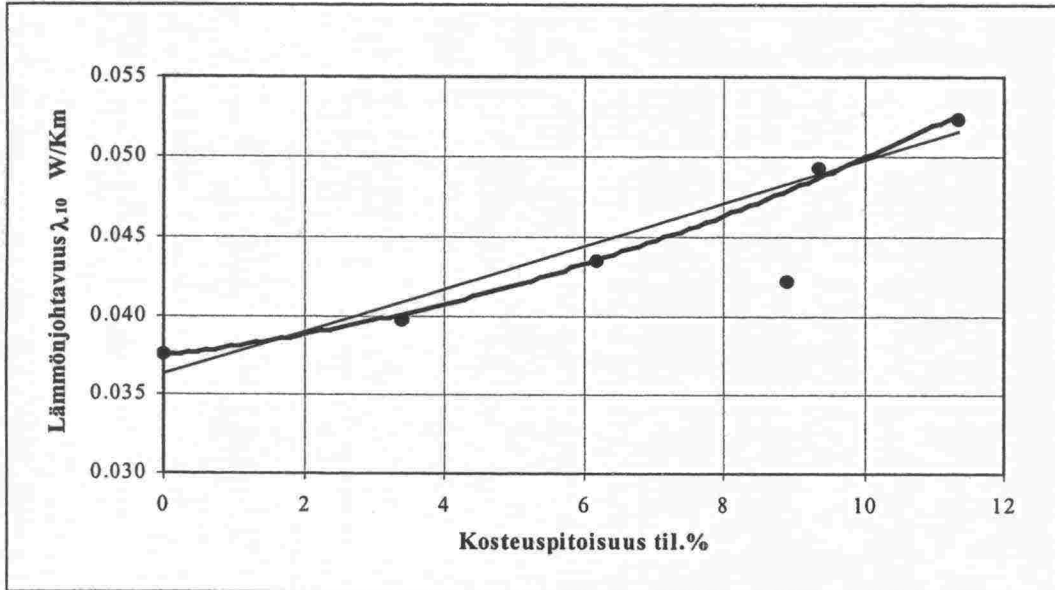
Kuten edellä todettiin, näytekappaleet sahattiin viipaleiksi veden imeytymisen lisäämiseksi. Viipaloinnista lämmönjohtavuusmittauksiin aiheutuvaa virhettä arvioitiin vertaamalla kuivan viipaloidun ja kuivan kokonaisen näytekappaleen lämmönjohtavuutta (ks. taulukko 4.6). Viipaloidulle näytekappaleen lämmönjohtavuudelle saatiin runsaat 2 % pienempi arvo kuin kokonaisen näytekappaleen lämmönjohtavuudelle.

Taulukko 4.6. Kokonaisesta ja viipaloidusta kuivasta näytekappaleesta määritetyt lämmönjohtavuudet (W/Km). Lämmönjohtavuuksien ero on syytä huomioida viipaloitujen näytekappaleiden lämmönjohtavuuksia arvioitaessa.

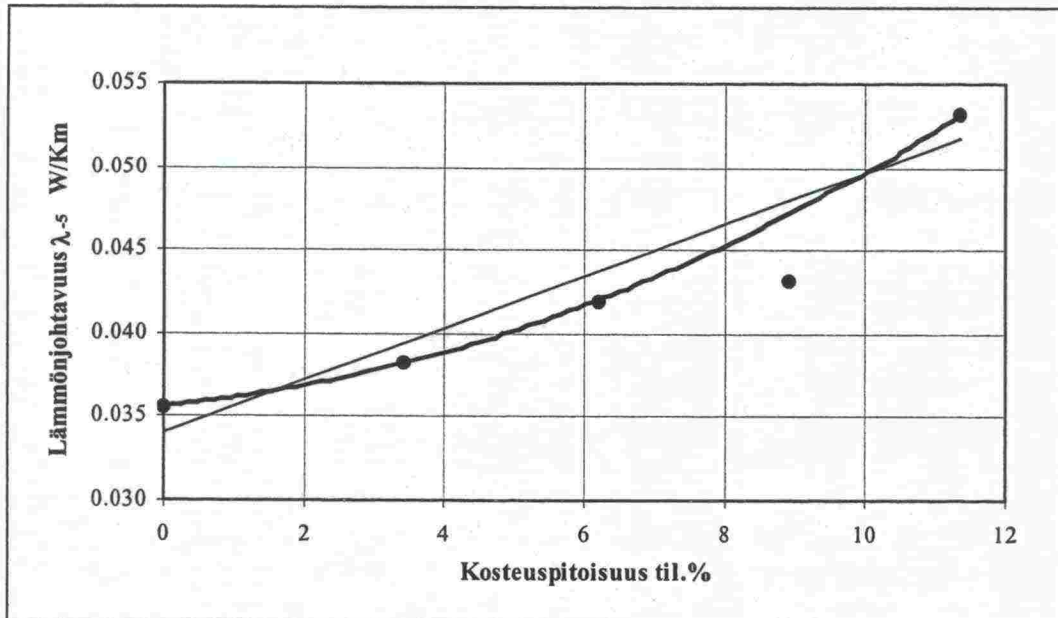
| Keskilämpötila Mittauksessa °C | Lämmönjohtavuus W/Km | | |
|-----------------------------------|----------------------|------------|-------------------------|
| | Viipaloitu | Kokonainen | Kokonainen - viipaloitu |
| +10 | 0,0367 | 0,0376 | 0,0009 |
| -5 | 0,0347 | 0,0355 | 0,0008 |

Lämmönjohtavuusmittaukset tehtiin TTKK:n talonrakennustekniikan laboratoriossa. Kostutettujen näytteiden lämmönjohtavuus mitattiin alkuperäisessä järjestyksessä päällekkäin kasatuista kappaleista, jotka käärittiin muovikelmulla haihtumisen estämiseksi ja viipaleiden kiristämiseksi. Edellä mainittu vähäinen, runsaan 2 % ero viipaloidun ja kokonaisen näytteen lämmönjohtavuuksissa voidaan arvioida johtuvan mahdollisesta viipaloidun näytteen sahauspintojen väliin jääneestä ilmasta. Tosin on huomattava, että valmistajan mittalaitteelle lupaama mittaustarkkuus on 61 %.

Kuvassa 4.4 on esitetty näytekappaleista +10 °C keskilämpötilassa mitattu, ja kuvassa 4.5–5 °C keskilämpötilassa mitattu lämmönjohtavuus näytteen kosteuspitoisuuden suhteen. Kuvista nähdään selkeä korrelaatio lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden välillä. Lämmönjohtavuusarvoissa on huomioitu taulukossa 4.6 esitetty levyn viipaloinnista johtuva korjaustermi.



Kuva 4.4. Styrodur C-RHS –levystä saatuista viipaloituista koekappaleista +10 °C keskilämpötilassa määritetyt lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden suhteen. Mitattuihin lämmönjohtavuusarvoihin on lisätty viipaloinnista aiheutunut menetelmävirhe 0,0009 W/Km (vrt. taulukko 4.6). Yhtä muista huomattavasti poikkeavaa mittaustulosta ei ole huomioitu trendisuoran ja polynomisen toisen asteen trendikäyrän laadinnassa.



Kuva 4.5. Styrodur C-RHS –levystä saatuista viipaloituista koekappaleista -5 °C keskilämpötilassa määritetyt lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden suhteen. Mitattuihin lämmönjohtavuusarvoihin on lisätty viipaloinnista aiheutunut menetelmävirhe 0,0008 W/Km (vrt. taulukko 4.6). Yhtä muista huomattavasti poikkeavaa mittaustulosta ei ole huomioitu trendisuoran ja polynomisen toisen asteen trendikäyrän laadinnassa.

Yksi mittaushavainto poikkeaa selkeästi muiden perusteella odotettavissa olevasta lämmönjohtavuudesta alaspäin. Syynä tähän saattaa olla se, että kyseisen näytteen viipaleet käännettiin diffuusiokontissa kostutuksen ollessa puolivälissä. Näin ollen kosteuden jakautuminen tämän näytteen viipaleissa on oletettavasti tasaisempi kuin muissa näytteissä, jolloin yhtenäisiä hyvin lämpöä johtavia märkeä alueita, ”kosteuskanavia”, on vähemmän kuin näytteessä, jossa sama kosteus on epätasaisemmin jakautunut. Kyseistä poikkeavaa havaintoa ei huomioitu kuvien 4.4 ja 4.5 trendikäyrien laadinnassa

Kuviin 4.4 ja 4.5 piirretyistä trendikäyristä havaitaan, että polynominen riippuvuus kuvaa kosteuspitoisuuden vaikutusta levyn lämmönjohtavuuteen paremmin kuin lineaarinen riippuvuus. Taulukossa 4.7 on esitetty trendikäyrien kaavat ja korrelaatiokertoimien (R^2) arvot.

Taulukko 4.7. Kuviissa 4.4 ja 4.5 esitettyjen lineaaristen ja polynomisten trendikäyrien kaavat ja korrelaatiokertoimet.

| Keskilämpötila Mittauksessa °C | Trendikäyrän kaava | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| | Lineaarinen | Polynominen |
| + 10 | $\lambda_m = 0,00134 w + 0,03634$ | $\lambda_m = 0,000070 w^2 + 0,000545 w + 0,037452$ |
| - 5 | $\lambda_m = 0,00160 w + 0,03404$ | $\lambda_m = 0,000085 w^2 + 0,000607 w + 0,035414$ |
| | Trendikäyrän korrelaatiokerroin | |
| | Lineaarinen | Polynominen |
| + 10 | $R^2 = 0,968$ | $R^2 = 0,997$ |
| - 5 | $R^2 = 0,964$ | $R^2 = 0,999$ |

Arvioitaessa mitoituksessa käytettäväksi soveltuvaa lämmönjohtavuusarvoa voidaan todeta, että kuvien 4.4 ja 4.5 perusteella saadaan aiemmin levyn mitoittavaksi kosteuspitoisuudeksi esitettyä 10 til.% vastaavaksi lämmönjohtavuudeksi 0,050 W/Km, jota esitetään käytettäväksi XPS-routalevyn mitoituslämmönjohtavuutena tähän asti käytetyn 0,037 W/Km sijasta. Routalevyn lämmönvastusta laskettaessa tulee lisäksi ottaa huomioon levyn asennustavan (sepelirakeiden painautuminen), levyn kokoonpuristuman sekä arvaamattomien olosuhdetekijöiden vaikutus vähentämällä tehokkaasta eristepaksuudesta 10 mm, kuten tähänkin asti.

Tarkasteltaessa tehtyjen lämmönjohtavuusmittausten sovellettavuutta ratarakenteeseen asennettujen routalevyjen lämmönjohtavuuden arviointiin on syytä todeta, että kosteuden jakautuminen levyn paksuussuunnassa on erilainen. Ratarakenteessa levyjen kosteus keskittyy ennen kaikkea levyn pintaosiin (Refsdal 1987, Jonsson 1993). Edellä kuvatun viipaloinnin ja keinotekoisen diffuusioaltistuksen tuloksena on tasaisempi kosteusjakautuma, joskin yksittäisissä viipaleissa kosteuspitoisuus lienee suurimmillaan viipaleen alapinnalla. Yksittäisen, muista mittauksista poikkeavan havainnon aiheuttaneen näytekappaleen viipaleet käännettiin edellä mainitun mukaisesti, minkä johdosta niiden kosteuspitoisuus arvioitiin muita tasaisemmaksi myös yksittäisissä viipaleissa. Näytteestä mitattu lämmönjohtavuus oli huomattavasti pienempi kuin muiden mittausten perusteella odotettavissa ollut arvo. Tästä johtuen on syytä epäillä, että

tietyllä kosteuspitoisuudella lämmönjohtavuus tasaisen kosteuspitoisuuden omaavassa kappaleessa on pienempi kuin kappaleessa, jossa kosteus on epätasaisesti jakautunut muodostaen siten yhtenäisiä märkiä alueita, ”kosteuskanavia”, joissa lämmön johtuminen on huomattavan suurta.

Yllä esitettyä ajatusta tukee eri keskilämpötiloissa tehtyjen mittausten keskinäinen vertailu. Yleisesti ottaenhan kuivan materiaalin lämmönjohtavuus pienenee lämpötilan laskiessa, kun taas kosteassa materiaalissa tilanne on päinvastainen johtuen jään suuresta lämmönjohtavuudesta. Syksyllä 2000 ratarakenteesta otetuista näytteistä mitatuissa lämmönjohtavuuksissa havaittiin lämmönjohtavuus -5 °C keskilämpötilassa suuremmaksi kuin $+10\text{ °C}$ keskilämpötilassa jo 2,0 til.% kosteuden omaavassa näytteessä, kun taas nyt keinotekoisesti kostutetuissa näytteissä vielä kosteudeltaan 6,2 til.% kappaleen lämmönjohtavuus havaittiin pienemmäksi mitattuna -5 °C keskilämpötilassa kuin $+10\text{ °C}$ keskilämpötilassa. Tämä saattaa olla seurausta jo edellä epäilyistä kosteuden jakautumisen tasaisuudesta, jonka vaikutuksen voidaan arvioida korostuvan alle 0 °C lämpötiloissa, jolloin edellä kuvattuja ”kanavia” muodostaa XPS-materiaaliin nähden monikymmenkertaisen lämmönjohtavuuden omaava jää.

Edellä esitetyn teorian nojalla ratarakenteessa esiintyvällä epätasaisella kosteuskakaumalla kosteuden vaikutus XPS-levyn lämmönjohtavuuteen on etenkin pakkaslämpötiloissa suurempi kuin tämän tutkimuksen tuloksena kuvissa 4.4 ja 4.5 esitetty.

Verrattaessa taulukossa 4.7 esitettyjä kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden lineaarisen korrelaation verrannollisuuskertoimia kuvassa 4.3 eri lähteissä esitettyjen havaintojen perusteella määritettyihin kertoimiin voidaan todeta sekä -5 °C keskilämpötilassa että $+10\text{ °C}$ keskilämpötilassa määritettyjen kertoimien sijoittuvan kuvan 4.3 kahden suurimman korrelaatiokertoimen välille.

4.5 Lämpötilagradientti

4.5.1 Lämpötilagradientti jäätyneessä rakenteessa

Ratarakenteen jäätyneessä osassa vallitseva lämpötilagradientti määrää lämpövirran suuruuden rakenteen läpi Fourierin lain (ks. kappale 2.2.2) mukaisesti. Lämpötilagradientti määritetään routarajan yläpuolelta juuri jäätyneestä kerroksesta, koska lämpötasealueen ollessa routarajalla tulee tasealueelta poistuvan lämpömäärän laskennassa käyttää välittömästi routarajan yläpuolella vallitsevaa lämpötilagradienttia ja lämmönjohtavuutta.

Yleinen oletus roudan syvyyden laskentamenetelmissä on, että rakenteen pinnan lämpötila laskee pakkaskauden alkaessa yhtäkkisesti pakkaskauden keskimääräiseen lämpötilaan ja säilyy tässä lämpötilassa koko pakkaskauden ajan. Tällöin jäätyneessä maassa vaikuttava keskimääräinen lämpötilagradientti voidaan laskea kaavalla 4-10. Useissa homogeenisen maan routaantumisen laskentamenetelmissä oletetaan lisäksi, että lämpötila rakenteessa kasvaa lineaarisesti syvyyden suhteen routarajalle saakka, jolloin lämpötilagradientti koko jäätyneessä rakenteessa on vakio ja laskettavissa kaavalla 4-10.

$$G_- = \frac{T_f}{z}, \text{ jossa} \quad (4-10)$$

- G_- = keskimääräinen lämpötilagradientti jäätyneessä rakenteessa, °C/m
 T_f = maan pinnan lämpötila (oletus = pakkaskauden keskilämpötila), °C
 z = vallitseva roudan syvyys, m

Oletusten perusteella lämpötilagradientti jäätyneessä rakenteessa pienenee pakkaskauden edetessä, koska pakkaskauden keskilämpötila (T_f) on vakio, kun taas roudan syvyys (z) kasvaa.

Kappaleessa 3.1.8 esitetyissä kerroksellisen rakenteen roudan syvyyden laskentamenetelmissä jäätyneen kerroksen lämpötilagradienttia ei varsinaisesti tarvitse laskea, sillä sen merkitys sisältyy tietyn kerroksen jäätymiseen vaadittavan pakkasmäärän laskentaan st. Paulin menetelmällä (ks. kappale 3.1.8). Kerroksellisessa rakenteessa jäätyneessä maassa routarajalla vaikuttava lämpötilagradientti voidaan Saarelaisen (1992) mukaan laskea kaavalla 4-11. Kaavaa käytetään SSR-mallissa, jossa roudan syvyyden laskentatarkastelut on jaettu aika-askeleisiin siten, että lämpötilagradientti lasketaan tietyllä aika-askeleella vaikuttavana keskimääräisenä arvona (ks. kappale 3.2.3).

$$G_- = \frac{T_f}{z^*} = \frac{T_f}{\lambda_{fn} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{\lambda_{fi}}}, \text{ jossa} \quad (4-11)$$

- G_- = lämpötilagradientti jäätyneessä maassa routarajalla, °C/m
 T_f = maan pinnan lämpötila, °C
 z^* = tehokas roudan syvyys, m
 z_i/λ_{fi} = R_i = jäätyneen kerroksen i lämmönvastus, m²K/W
 z_i = roudan paksuus routaantuvassa kerroksessa i , m
 λ_{fi} = routaantuvan kerroksen i jäätynyt lämmönjohtavuus, W/Km
 n = routaantuneiden kerrosten lukumäärä

Kaavaa 4-11, kuten myöskään kaavaa 4-10, ei voida sinällään käyttää pakkaskauden aikaisen keskimääräisen lämpötilagradientin laskemiseen, koska roudan syvyys (z tai Σz_i) muuttuu pakkaskauden aikana, minkä johdosta laskenta olisi syytä suorittaa aika-askelittain kuten SSR-mallissa, tai vaihtoehtoisesti käyttämällä kaavassa arvioitua roudan keskimääräistä syvyyttä pakkaskaudella. Käytettäessä suurinta roudan syvyyttä (z_f) saadaan lämpötilagradientille pakkaskauden keskimääräistä arvoa pienempi arvo.

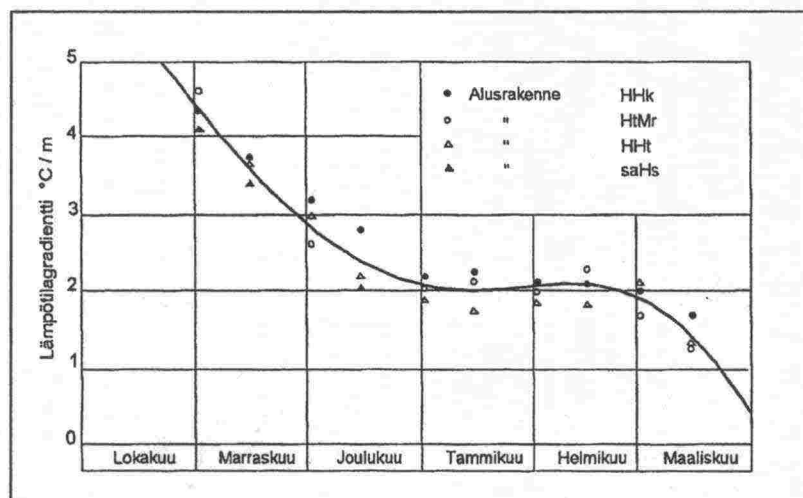
4.5.2 Lämpötilagradientti routarajan alapuolella

Sulassa maassa routarajan alapuolella vallitseva lämpötilagradientti aiheuttaa lämmön virtaamisen sulasta maasta routarajalle Fourierin lain (ks. kappale 2.2.2) mukaisesti. Sulasta maasta routarajalle virtaava jäähtymislämpö otetaan roudan syvyyden laskentamenetelmissä huomioon Beskowin ja Skaven-Haugin menetelmissä pakkassummaa redusoimalla (ks. kappale 3.1.5 ja 3.1.7).

Lämpötilagradientti, ja siten routarajalle sulasta maasta virtaava lämpömäärä, on sitä suurempi, mitä nopeammin lämpötila kasvaa syvemmälle mentäessä, eli mitä suurempi on maahan kesäkaudella varastoitunut lämpömäärä.

Muutokset ilman lämpötilassa vaikuttavat merkittävimmin maan pintakerrosten lämpötilaan. Tästä syystä sulan maan lämpötilagradientti on suurimmillaan routarajan alapuolella ja pienenee syvemmälle mentäessä lähestyen vuotuisen lämpötilavaihtelualueen, noin 10-15 metrin syvyyden (Ehrola 1996, Aittomäki 1986), alapuolella vaikuttavaa geotermisen lämmön gradienttia, joka on varsin pieni, suuruusluokaltaan noin $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (Aittomäki 1986).

Lämpötilagradientti routarajan alapuolella on suurimmillaan pakkaskauden alussa ja pienenee pakkaskauden edetessä (ks. kuva 4.6). Käytännössä on, että routarajalle virtaavan lämpömäärän laskelmissa lämpötilagradienttina jäätymisvyöhykkeessä käytetään routarajan alla vallitsevaa pakkaskauden keskimääräistä gradienttia (Ehrola 1996).



Kuva 4.6. Routarajan alapuolella vallitsevan lämpötilagradientin vaihtelu pakkaskauden aikana Oulun seudun tiestöllä vuosina 1970-73 tehtyjen havaintojen mukaan (Ehrola 1974b)

Skaven-Haugin (1971) mukaan pakkaskauden keskimääräistä lämpötilagradienttia edustamaan voidaan valita 1-1,5 metriä välittömästi routarajan alla 1. helmikuuta vaikuttava keskimääräinen arvo. Skaven-Haugin on selvitystensä perusteella saanut lämpötilagradientille varsin selvän riippuvuuden mittauspaikkakunnan normaalivuoden keskilämpötilasta. Riippuvuutta mallinnetaan kaavalla 4-12.

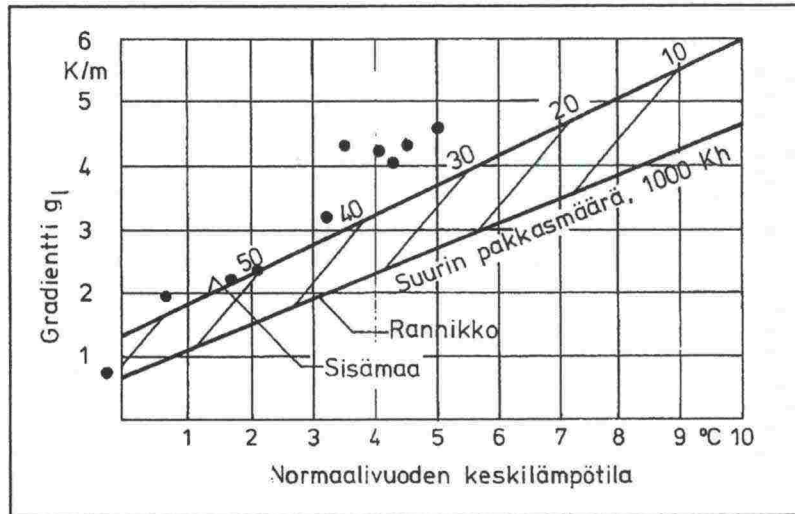
$$G_+ = 0,43 \cdot T_u + 1 \quad , \text{ jossa} \quad (4-12)$$

G_+ = keskimääräinen lämpötilagradientti 1-1,5 metriä välittömästi routarajan alapuolella 1. helmikuuta, $^{\circ}\text{C}/\text{m}$

T_u = normaalivuoden ilman keskilämpötila, $^{\circ}\text{C}$

Skaven-Haug vertasi lämpötilagradienttia myös alueen maksimipakkasmäärään. Tuloksena oli havaittavissa, että saman vuotuisen keskilämpötilan vallitessa lämpötila-

gradientti kasvaa maksimipakkasmäärän kasvaessa. Tämä on luonnollinen seuraus siitä, että suuremmalla maksimipakkasmäärän alueella kesien tulee olla lämpimämpiä, ja siten maan lämpötilagradientin syksyllä suurempi kuin pienemmän maksimipakkasmäärän alueella, kun vuotuinen keskilämpötila molemmilla alueilla on sama. Tarkastelujen tuloksena Skaven-Haug esitti kuvan 4.7 mukaisen diagrammin, jossa lämpötilagradientin määrittämistä on tarkennettu kaavan 4-12 mukaisesta ottamalla huomioon myös alueen maksimipakkasmäärä.



Kuva 4.7. Keskimääräinen lämpötilagradientti 1-1,5 metriä routarajan alapuolella 1. helmikuuta normaalivuoden ilman keskilämpötilan ja alueen maksimipakkasmäärän suhteen. Ylempi suora kuvastaa sisämaailmasto-olosuhteita ja alempi suora leutoja meri-ilmasto-olosuhteita. (Skaven-haug 1971). Suomessa havaittuja arvoja on merkitty pisteellä. (Saarelainen 1990).

Kuvasta 4.7 nähdään, että Suomessa määritetyt lämpötilagradientin arvot sijoittuvat sisämaaolosuhteita edustavan suoran yläpuolelle. Näin ollen lämpötilagradientin arvioimiseen soveltunee Suomessa kaavaa 4-12 paremmin sisämaaoiloja kuvassa 4.7 edustava suora, jolloin lämpötilagradientti voidaan esittää kaavan 4-13 muodossa.

$$G_+ = 0,47 \cdot T_u + 1,4 \quad (4-13)$$

Esitetty lämpötilagradientin määrittämismenetelmä pätee erittäin hyvin Ehrolan (1974b) Oulun seudun tiestöllä tekemissä mittauksissa. Mittauskohteissa pakkaskauden keskimääräinen lämpötilagradientti routarajan alapuolella yhden metrin paksuisessa maakerroksessa vuosina 1970-73 oli keskimäärin $2,3 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ ja ilman vuotuinen keskilämpötila vuosina 1958-73 keskimäärin $2,0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Maalaji vaikuttaa lämpötilagradienttiin siten, että karkearakeisissa maalajeissa sekä moreeneissa lämpötilagradientti on pienempi kuin hienorakeisissa maalajeissa (vrt. kuva 4.6) (Ehrola 1974b).

Sulan maan lämpötilagradienttia tarvitaan myös routimisen arvioimiseen segregaatipotentialiteorian mukaisessa laskennassa. Veden virtauksen routarajalle (routimisen) kuvataan segregaatipotentialiteoriassa olevan verrannollinen sulan maan lämpötilagradienttiin. Verrannollisuuskertoimena on segregaatipotentialiaali (ks. kappale 3.2.2).

4.6 Rakennemateriaalien vesipitoisuus

Rakennemateriaalin vesipitoisuudella on aiemmissa kappaleissa esitetyn mukaisesti ratkaiseva merkitys sekä rakennekerroksen jäätymisvastukseen että lämmönjohtavuuteen. Vesipitoisuuden kasvaessa veden jäätyislämpö ja edelleen kerroksen jäätymisvastus lisääntyvät. Myös lämmönjohtavuus kasvaa vesipitoisuuden lisäyksen seurauksena. Jäätyneessä maassa tämä merkitsee maaperästä vapautuvan lämmön pois virtaamisen helpottumista. Sulasta maasta routarajalle virtaavaan jäähtymislämpöön lämmönjohtavuuden lisäys vaikuttaa jäähtymislämpöä lisäävästi ja siten roudan tunkeutumissyvyyttä alentavasti, tosin tällainen sulan maan jäähtymislämmön laskentatapa sisältyy kappaleessa 3.1 esitetyistä roudan syvyyden laskentamenetelmistä ainoastaan Beskowin menetelmään.

Arvioitaessa vesipitoisuuden vaikutusta roudan syvyyteen havaitaan, että yllä mainituista vesipitoisuudesta suuresti riippuvista tekijöistä vesipitoisuuden kasvaessa lisääntyvä jäätyislämpö sekä sulan maan lämmönjohtavuus vaikuttavat roudan tunkeutumissyvyyttä pienentävästi ja jäätyneen maan kasvava lämmönjohtavuus vastaavasti roudan tunkeutumissyvyyttä lisäävästi (Jernbeneverket 1999). On oletettavaa, että käytettäessä laskelmissa todellista suurempia vesipitoisuuksia päädytään epävarmalle puolelle, eli tällöin lisääntyneen jäätyislämmön (ja sulan maan jäähtymislämmön) roudan tunkeutumisesta hidastava vaikutus on jäätyneen maan lämmönjohtavuuden lisäyksen vaikutusta suurempi. Asiaa on tarkasteltu lähemmin kappaleessa 5 esitetyissä herkkyystarkasteluissa. Oleellista on joka tapauksessa se, että mitoituksessa jäätyislämmön laskennassa käytettävä vesipitoisuus huomioidaan siten, että myös mitoituslämmönjohtavuus vastaa kyseistä vesipitoisuutta (Jernbeneverket 1999).

Vesipitoisuus riippuu useista tekijöistä, joista rakeisuus on merkittävin. Hienorakeisen aineksen määrän kasvaessa materiaalin vedenpidätyskyky lisääntyy. Tehokkaasti järjestetty rakenteen kuivatus luonnollisesti vaikuttaa vesipitoisuuteen alentavasti. Yleistäen voidaan olettaa, että ratarakenteen pintaa lähimpänä olevat massat ovat kuivimpia vesipitoisuuden kasvaessa pohjavedenpintaa kohti (Jernbeneverket 1999).

Vesipitoisuuden mitoitusarvon määrittämisessä hankaluutena on sen vaihtelu riippuen sääoloista, vuodenajasta ja rakenteen kuivatuksesta. Niinpä mitoitusarvoksi lienee järkevää valita ainakin jollakin tasolla yleistetty arvo, jolla päädytään roudan tunkeutumissyvyydessä lievästi varmalle puolelle.

Taulukossa 4.8 on esitetty tierakennemateriaaleissa tehtyjen havaintojen (Johansen et al 1976) perusteella eri materiaaleille vesipitoisuusrajat, jonka 10 %, 50 % ja 90 % havainnoista alitti. Kuten taulukosta nähdään, vesipitoisuuden vaihteluväli on suuri vaikka vertailusta jätetään kuivin 10 % ja kostein 10 % huomioimatta, eli verrataan raja-arvoja, jonka 10 % ja 90 % havainnoista alitti.

Tierakenteen alustavaan routamitoituksen soveltuvisissa mitoituskäyrästöissä (Saarelainen & Kivikoski 2000) on käytetty vesipitoisuusarvoina kantavan kerroksen murskeelle 3 %, jakavan kerroksen soralle 3 % ja suodatinkerroksen hiekalle 12 %.

Taulukko 4.8. Tierakenteessa tehtyjen havaintojen mukainen vesipitoisuus (p.%) eri rakenne-materiaaleilla esitettyinä arvoina, jonka tehdyistä havainnoista alitti 10 %, 50 % ja 90 % (Johansen et al. 1976).

| Materiaali | Vesipitoisuus, jota kuivempia on 10 %, 50 % tai 90 % havainnoista, (p.%) | | |
|------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| | 10 % havainnoista alle: | 50 % havainnoista alle: | 90 % havainnoista alle: |
| Sula hiekka | 3 | 6 | 12,5 |
| Jäätynyt hiekka | 3 | 7,5 | 14 |
| Sula hiekka pvp:n alla | 11 | 14 | 17 |
| Sula hiekka täytössä | 3 | 5 | 7 |
| Sula sora | 1,5 | 4 | 6 |
| Sula sora täytössä | 1 | 2,5 | 4 |
| Jäätynyt sora | 2,5 | 5 | 7 |
| Jäätynyt kalliomurske | 1 | 2,5 | 5 |

Sepelitukikerroksen vesipitoisuuden on todettu vaihtelevan sääolojen mukaan siten, että talvella tukikerroksen vesipitoisuus kasvaa huomattavasti johtuen pakkaskauden aikana vallitsevan lyhytaikaisen leudon jakson seurauksena tukikerrokseen päätyvistä sulamis-vesistä (Johansen 1982). Mittausten ja simulointien perusteella Norjassa on oletettu sepelikerroksen keskimääräiseksi vesipitoisuudeksi 2 % sulassa ja 10 % jäätyneessä tukikerroksessa. Alusrakennesorakerroksen keskimääräiseksi vesipitoisuudeksi oletetaan 5 % läpi vuoden (Johansen 1982).

Ratarakennemateriaalien vesipitoisuuden tyypillisiä arvoja on esitetty taulukossa 4.5 (Jernbaneverket 1999). Tukikerroksen osalta todetaan, että nykyisin Norjassa käytettävällä rakeisuudella (25-63 mm) 2 %:n vesipitoisuutta tuskin ylitetään. Raide-sepelin hienontuneessa liikennekuormituksen alaisena sen vesipitoisuus tosin kasvaa. Louheessa (sprengstein) vesipitoisuudeksi arvioidaan 0,5-1,5 %. Sekarakeisessa materiaalissa vesipitoisuus saattaa olla jonkin verran em. arvoa suurempi. Alusrakennesoran ja -hiekkan osalta todetaan vesipitoisuuden kasvavan pohjavedenpintaa lähestyttäessä. (Jernbaneverket 1999)

Routalevyssä kosteuspitoisuuden merkitys roudan tunkeutumissyvyyteen korostuu siinä mielessä, että levyn jäätymisvastus on kosteuspitoisuudesta riippumatta olematon. Levyn lämmönjohtavuus sitä vastoin kasvaa kosteuspitoisuuden kasvaessa, jonka seurauksena levyn kyky alapuolisista kerroksista vapautuvan lämmön poistumisen hidastamiseen heikkenee. Näin ollen routalevyn kohdalla ei vesipitoisuuden muuttumisesta aiheudu maamateriaaleille kuvattua osittain toisiaan kumoavaa vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen.

XPS-routalevyn kosteuspitoisuutta ja sen kehittymistä ratarakenteessa on käsitelty tarkemmin aiemmassa tutkimuksessa (Nurmikolu & Kolisoja 2001a), mistä syystä tässä yhteydessä todetaan ainoastaan, että aiempien tutkimusten perusteella XPS-routalevyn lämmönjohtavuuden kannalta mitoittavaksi kosteuspitoisuudeksi arvioitiin 10-12 til.%. Todettakoon vielä, että syynä yksinomaan XPS-routalevyjen käyttöön ratarakenteen

routaeristeenä on aiemmin käytettyjen muottipaisutettujen EPS-levyjen kosteuden imusta saadut huonot kokemukset (Myyrä 1983, Nurmikolu & Kolisoja 2001b).

4.7 Rakennemateriaalien kuivatiheys

Materiaalin kuivatiheyden suurentuessa lisääntyy sen lämmönjohtavuus ja tilavuus-lämpökapasiteetti edellä esitetyn mukaisesti. Taulukkoon 4.9 on koottu eri lähteissä esitettyjä tyypilliseksi arvioituja tai esimerkkilaskelmissa käytettyjä materiaalin kuivatiheyden arvoja. Myös aiemmin lämmönjohtavuutta käsiteltäessä taulukoissa 4.2, 4.4 ja 4.5 esitettiin arvioita materiaalin kuivatiheydestä.

Taulukko 4.9. Eri lähteissä esitettyjä tyypilliseksi arvioituja tai esimerkkilaskelmissa käytettyjä kuivatiheyden arvoja eri tie- ja ratarakennemateriaaleille.

| Materiaali | Tyypillinen kuivatiheys, (kg/m ³) | Lähde |
|--|---|------------------------------|
| Hiekka (radan suodatinkerros) | 1600 | Jernbaneverket 1999 |
| Hiekka (tien suodatinkerros) | 1700 | Saarelainen & Kivikoski 2000 |
| Hiekka (katurakenne) | 1850 | Helander 1986 |
| Hiekka (tien suod. & jak. ker.) * ¹) | 2000-2050 | Kolisoja 1996 |
| Sorainen hiekka (katurakenne) | 2000 | Helander 1986 |
| Sora (tien jakava kerros) * ¹) | 2080-2200 | Kolisoja 1996, 1993 |
| Sora (tien jakava & suod. kerros) | 1800 | Fischer 1991 |
| Sora (tien jakava kerros) | 1800 | Saarelainen & Kivikoski 2000 |
| Sora (radan alusrakenne) | 1800 | Jernbaneverket 1999 |
| Murske (tien kantava kerros) | 2000 | Saarelainen & Kivikoski 2000 |
| Murske (tien kantava kerros) | 2000 | Fischer 1991 |
| Murske (16-64 mm) * ¹) | 1700-1800 | Kolisoja 1997 |
| Tukikerrosseppi | 1500 | Jernbaneverket 1999 |
| Louhe (tien jakava kerros) | 1800 | Fischer 1991 |
| Sprengstein (ratarakenne) | 1800-1900 | Jernbaneverket 1999 |

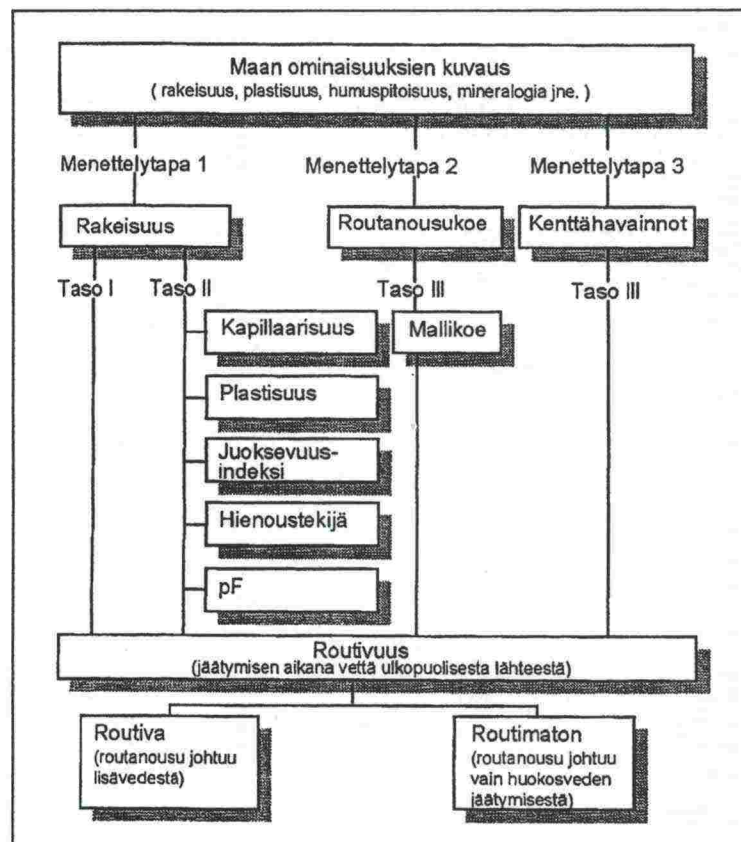
*¹) 10 cm kerroksina muottiin tiivistetty

4.8 Routivuuden arviointi

Roudan tunkeutumissyvyyden laskentaan perustuvien routamitoitusmenetelmien, ja siten myös ratarakenteen routamitoituksen lähtökohtana on, että routaantuvat maat ovat routimattomia. Usein tämä tarkoittaa sitä, että rakennekerrosten paksuus vastaa roudan mitoitussyvyyttä, koska routamitoitus on kantavuusmitoitukseen nähden useimmiten rakennekerrosten paksuuden suhteen määräävä. Pohjamaan ollessa routimatonta rakennekerrosten paksuutta voidaan ohentaa ja sallia roudan tunkeutuminen myös pohjamaahan, mikäli myös sen kantavuus on riittävä.

Maamateriaalin routimattomuuden määrittelyyn ei kuitenkaan ole olemassa yksiselitteistä keinoa. Routimattomalla maamateriaalilla tarkoitetaan yleensä maata, jossa normaaliolosuhteissa maan routaantuessa ei synny routimisen (routarajalle virtaavan veden) aiheuttamaa routanousua. Rakenteen routivuuteen vaikuttavat materiaalin lisäksi veden läsnäolo ja kulkeutuminen jäätyvään kerrokseen sekä jännitystila. Myös routimattomassa maamateriaalissa voi joissakin olosuhteissa, esimerkiksi silloin kun pohjaveden virtaus suuntautuu routarajalle, syntyä routimisesta aiheutuvaa routanousua.

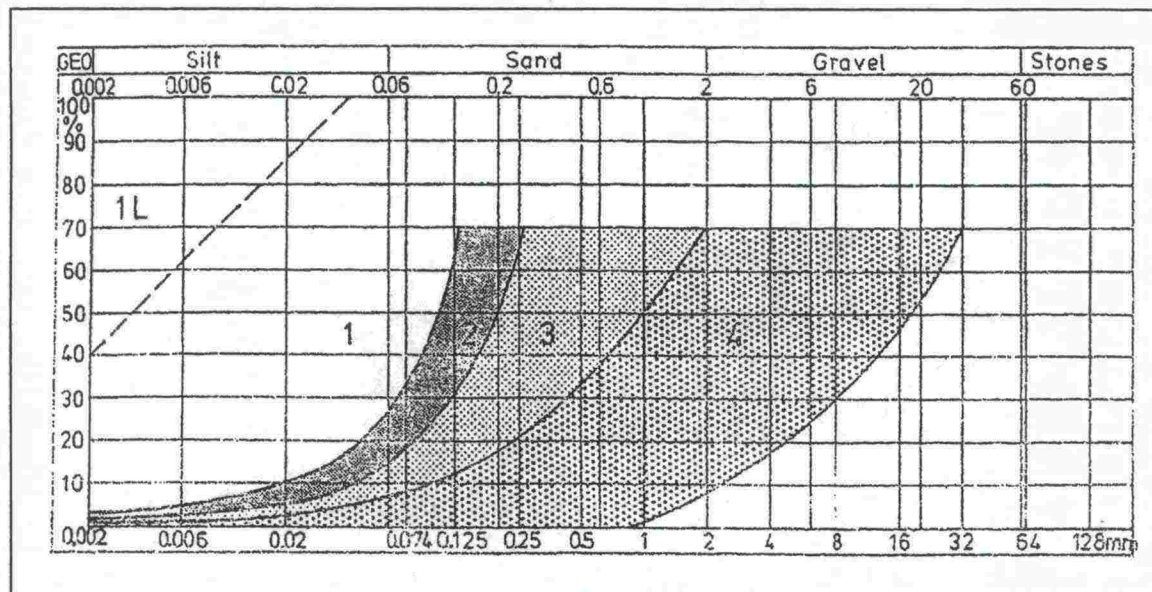
Maalajien routivuutta arvioidaan yleisimmin maa-aineksen rakeisuuden perusteella. Rakeisuuteen perustuvaa luokitusta voidaan täydentää kuvassa 4.8 esitetyn kaavion mukaisesti maan luokitus- tai hydraulisiin ominaisuuksiin perustuvilla laboratorio- tutkimuksilla, routanousukokeilla tai kenttähavainnoilla. (RIL 1992)



Kuva 4.8. Maalajien routivuuden luokitusjärjestelmä (RIL 1992).

Kuvassa 4.9 on esitetty tierakenteen suunnittelussa Suomessa käytettävä rakeisuus-käyrästöön perustuva routivuusluokitus. Rajatapauksissa arvioita täsmennetään kapillaarisen nousukorkeuden määrittelyllä. Maalajia pidetään yleisesti routimattomana, kun kapillaarinen nousukorkeus on alle 1,0 m. Ratahallintokeskuksen luokituksessa, jossa on tietoisesti pyritty lisävarmuuteen, maamateriaalia pidetään routimattomana, kun sen kapillaarinen nousukorkeus on alle 0,7 m (Ratahallintokeskus 1999b). Vastaavasti norjalaisen luokituksen mukaan maalaji on routimatonta, kun siinä on raekooltaan alle 0,02 mm ainesta alle 3 % laskettuna materiaalista, joka läpäisee 19 mm seulan (Jernbaneanverket 1999, Saetersdal 1976).

Muita tekijöitä, joihin routivuus on todettu verrannolliseksi ovat mm. ominaispinta-ala, huokoskokojakauma ja plastisuusluku. Maalajien routivuutta ja routivuusluokituksia on käsitelty tarkemmin lähteissä Friberg ja Slunga (1989), ISSMFE (1989), Chamberlain ja Gaskin (1984), Saetersal (1976).



Kuva 4.9. Rakeisuuskäyrästöt, joihin routivuuden luokittelu tierakenteen suunnittelussa Suomessa perustuu. Routiviksi luokitellaan alueen 1 maalajit sekä ne alueiden 2, 3 ja 4 maalajit, joiden rakeisuuskäyrän alapää ulottuu hienomman alueen puolelle. Alueen 1L materiaalit ovat lievästi routivia. (ISSMFE 1989)

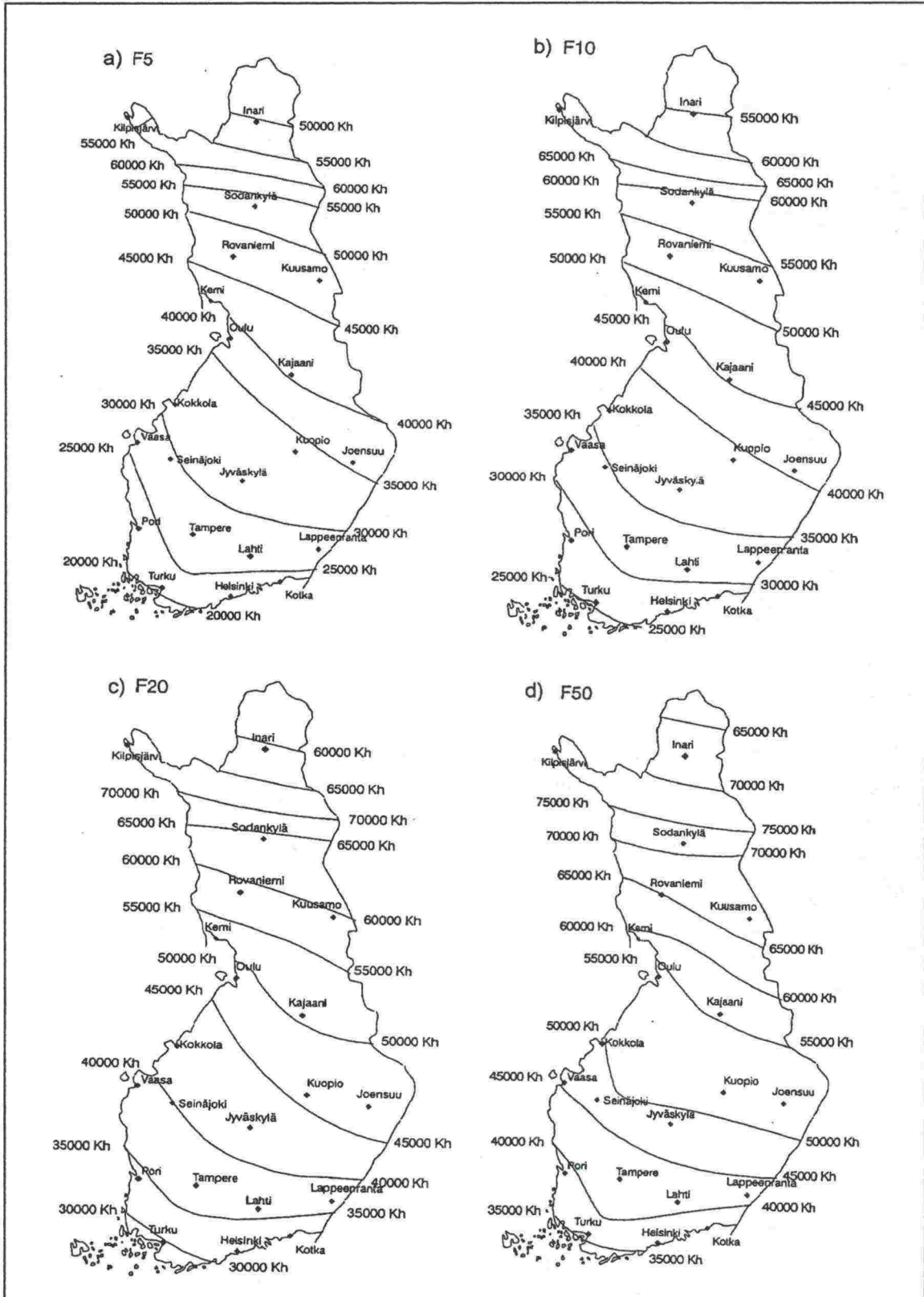
Tulevaisuudessa rakentamiseen käytettävissä olevien soravarojen vähentyessä murskatun kalliokiviaineksen käyttö korvaavana materiaalina radan rakennekerroksissa tulee lisääntymään. Kalliomurskeen routivuuden arviointi pelkän tuotteen rakeisuuden perusteella vastaavasti kuten luonnonkiviainesten kohdalla ei ole mahdollista. Murskatun kalliokiviaineksen routimattomuus ja ennen kaikkea routimattomuuden säilyminen jatkuvan liikenne- ja ympäristökuormituksen alaisena riippuu monista murskeen ominaisuuksista. Niinpä ennen kuin voidaan siirtyä laajamittaiseen kalliomurskeen käyttöön soraa korvaavana ratarakennemateriaalina, tulee tutkimuksin selvittää murskeelle asetettavat vaatimukset, joilla varmistetaan materiaalin säilyminen routimattomana ratarakenteen toistuvan mekaanisen kuormituksen sekä ympäristö- ja rasisitusten alaisessa rankassa kuormitusympäristössä.

4.9 Ilmastotekijät

Vuorokautinen ilman lämpötilan vaihtelu aiheuttaa maan lämpötilan vaihtelua ainoastaan noin 0,5 metrin syvyyteen (Saarelainen 1991). Sen sijaan vuotuinen ilman lämpötilavaihtelu vaikuttaa syvemmälle. Routamitoituksessa keskeisin kiinnostuksen kohde on se, kuinka syvälle rakenteeseen routa tunkeutuu. Näin ollen huomio voidaan keskittää vuotuisen lämpötilavaihteluun.

Kappaleessa 3.1 esitetyissä roudan syvyyden laskentamenetelmissä vaikuttavista ilmastoparametreista merkittävin on pakkasmäärä. Pakkasmäärä lasketaan tietyn keskimääräisen pakkaslämpötilan ja sen vaikutusajan tulona ja se vaihtelee huomattavasti vuosittain talven ankaruudesta riippuen. Pakkasmäärän yksikkönä

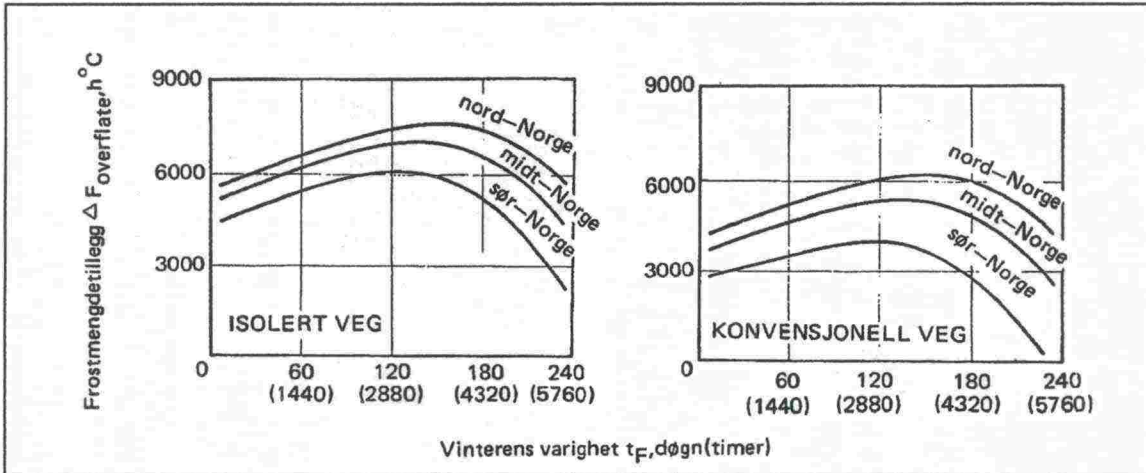
käytetään Kh tai Kd . Kuvassa 4.10 on esitetty tilastollisesti kerran tietyllä aikavälillä toistuvaksi laskettu vuotuinen ilman pakkasmäärä. Suomessa ratarakenteen routamitoituksessa on tärkeimmillä rataosilla käytetty kerran 50 vuodessa toistuvaa ilman pakkasmäärää F_{50} (vrt. taulukko 4.11).



Kuva 4.10. Kerran a) 5 b) 10 c) 20 d) 50 vuodessa toistuva ilman pakkasmäärä (Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1997).

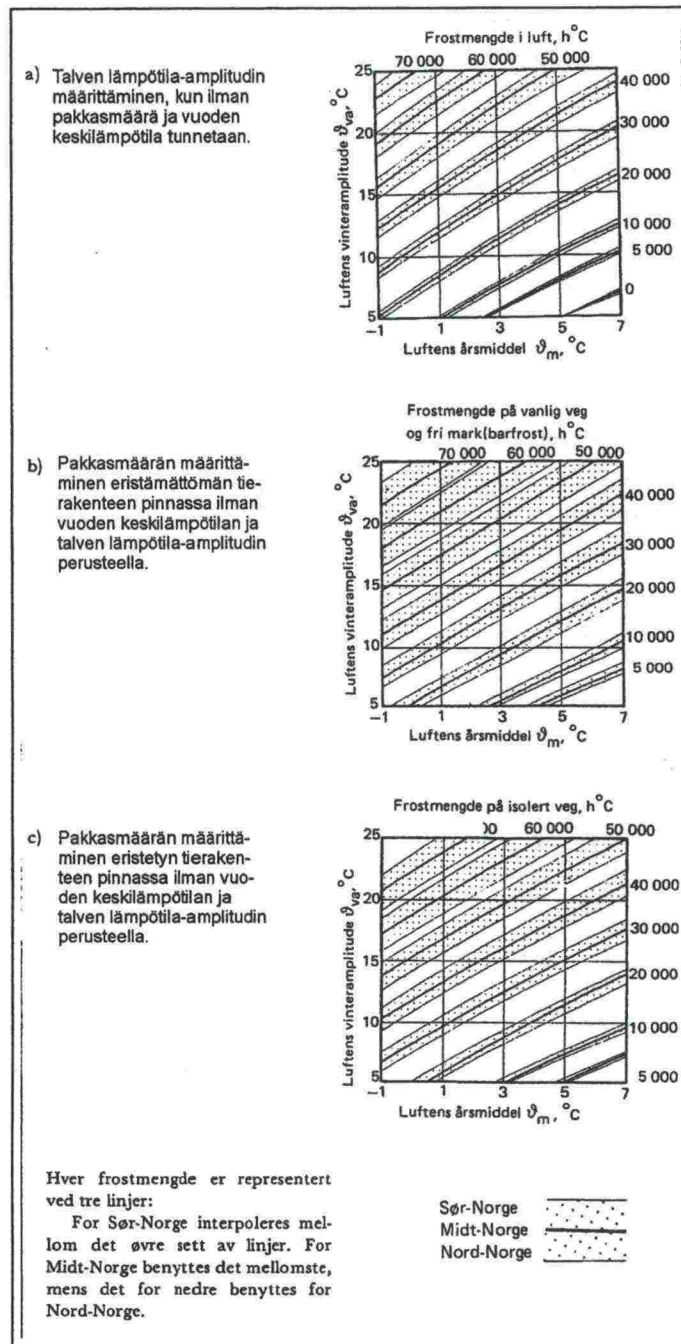
Routamitoituksessa mitoitavana pakkasmääränä tulisi käyttää pakkasmäärää mitoitettavan rakenteen pinnassa. Maanpinnan ja ilman lämpötilan välillä on ero, jonka suuruus riippuu eritoten maan pinnalla olevasta lumikerroksesta, rakenteen lämmönjohtavuudesta ja paikallisista olosuhteista, kuten auringosta säteilevän energian määrästä ja talvikauden kestosta. Tämän seurauksena myös pakkasmäärä maan pinnassa riippuu ilman pakkasmäärän lisäksi edellä mainituista tekijöistä.

Maanpinnan lämpötila on riippuvainen aurinkoenergiasta ja lämmönvaihdosta ympäristön kanssa. Tämä prosessi on kokonaisuudessaan melko monimutkainen, eikä se ole koskaan staattisessa tasapainotilassa. Kenttämittausten perusteella keskitälven (joulu-, tammi-, helmikuu) kuukausina *lumettoman* maanpinnan lämpötila on 2-3 °C alhaisempi kuin ilman. Syynä tähän on, että tuolloin maahan kohdistuva auringon säteilyenergia on vähäistä, kun taas maasta ympäristöön säteilevä energia on likimäärin vakio ympäri vuoden ollen talvikuukausina suurempi kuin auringon ja ympäristön säteilyenergia maahan. Vastaavasti kesällä maa absorboi auringon säteilyenergiaa enemmän kuin maasta säteilee ympäristöön. Näin ollen pakkassumma *lumettoman* rakenteen pinnalla on jonkin verran suurempi kuin ilmassa. Kuvassa 4.11 on esitetty *lumettoman* tierakenteen pinnan ja ilman pakkasmäärän ero sekä eristetyssä että eristämättömässä rakenteessa Norjassa tehtyjen mittausten perusteella. Pakkaskauden keston samoin kuin alueellisten tekijöiden vaikutus rakenteen pinnan ja ilman pakkasmäärän eroon ilmentää maahan kohdistuvan auringon säteilyenergian riippuvuutta em. tekijöistä. (Heiersted 1976)



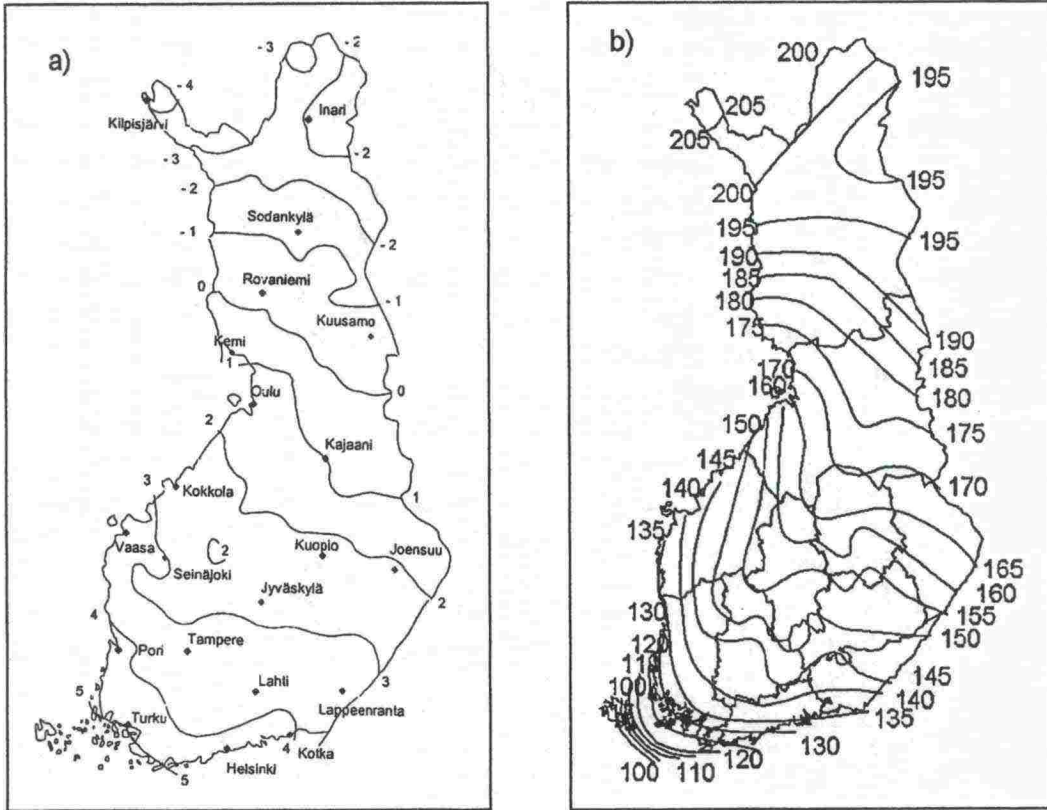
Kuva 4.11. Ero ilman ja a) eristetyn ja b) eristämättömän *lumettoman* tierakenteen pinnan pakkasmäärissä pakkaskauden keston suhteen (Heiersted 1976).

Kuten kuvasta 4.11 on nähtävissä, ilman ja *lumettoman* rakenteen pinnan lämpötilaero korostuu silloin, kun rakenne on eristetty. Tällöin eristekerros vaikeuttaa lämmön johtumista maassa, minkä seurauksena talvella sulasta maasta virtaavan lämmön on vaikeampi tunkeutua ylös maanpinnalle ja maanpinnan lämpötila on siten alhaisempi kuin eristämättömässä rakenteessa (Heiersted 1976). Kuvassa 4.12 on esitetty Norjassa tehtyihin mittauksiin perustuva menetelmä pakkasmäärän määrittämiseksi *lumettoman* eristämättömän ja eristetyn tierakenteen pinnassa ilman pakkasmäärän ja ilman vuoden keskilämpötilan perusteella (Johansen ja Frivik 1976). Määrittämisessä tarvittava ilman vuotuinen keskilämpötila saadaan kuvasta 4.13, samoin kuin pakkaskauden pituus.

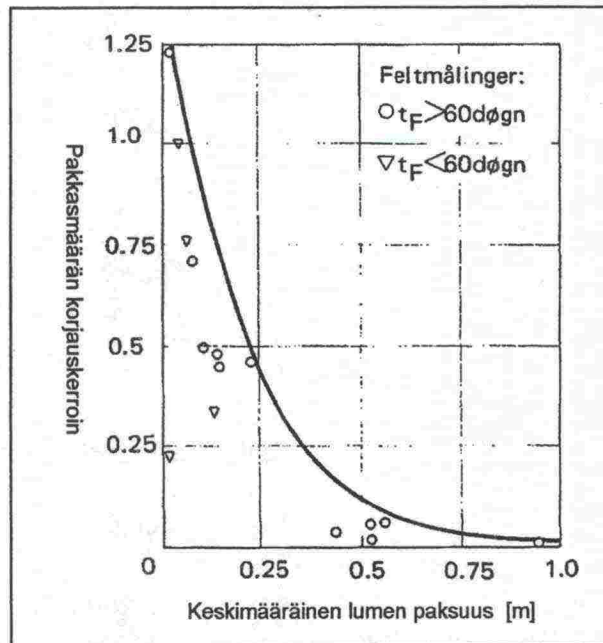


Kuva 4.12. Diagrammi pakkasmäärän määrittämiseksi lumettoman tierakenteen pinnassa ilman pakkasmäärän ja ilman vuotuisen keskilämpötilan perusteella, kun rakenne on b) eristämätön ja c) eristetty (Johansen ja Frivik 1976). Talven lämpötila-amplitudilla tarkoitetaan vuoden keskilämpötilan ja kylmimmän kuukauden keskilämpötilan erotusta (Heiersted 1976).

Maanpinnan ja ilman lämpötilojen väliseen eroon vaikuttaa merkittävästi maanpinnalla mahdollisesti oleva lumikerros. Kuten edellä todettiin, lumettoman maanpinnan lämpötila on talvikaudella muutaman asteen alhaisempi kuin ilman. Lumi toimii eristeenä maan pinnan ja kylmän ilman välillä ja jo pienelläkin lumikerroksella on huomattavaa merkitystä. Kuvassa 4.14 on esitetty korjauskerroin, jolla pakkasmäärää tulee lumen paksuudesta riippuen redusoida lumikerroksen vaikutuksen huomioimiseksi.

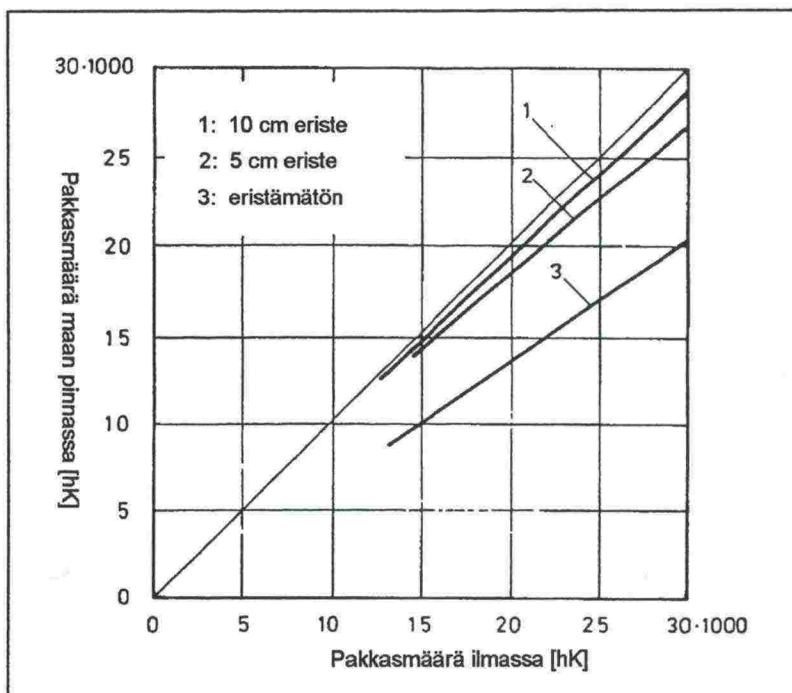


Kuva 4.13. a) Vuotuinen ilman keskilämpötila kaudelta 1961-90. (Saarelainen & Kivikoski 2000), b) pakkaskauden kesto (Ehrola 1996).



Kuva 4.14. Pakkaskauden keskimääräisestä lumikerroksen paksuudesta riippuva korjauskerroin maanpinnassa vaikuttavan pakkasmäärän laskemiseksi ilman pakkasmäärästä (Heiersted 1976).

Norjassa (Johansen 1982) mitattiin lämpötiloja radan tukikerroksesta, ratapölkyn alapinnalta, ja verrattiin lämpötiloja vastaaviin ilman lämpötiloihin. Mittausten pohjalta tehtyjen mallinnusten tulokset on esitetty kuvassa 4.15. Mallinuksissa radan pinnalla oletettiin olevan 5 cm lumikerros. Kuvan 4.15 perusteella radan pinnalla oleva lumi aikaansaa sen, että ilman pakkasumma on hieman suurempi kuin pakkasumma tukikerroksen pinnassa silloin, kun on kyse eristetyistä rakenteista. Eristämättömässä rakenteessa pakkasummien välinen ero on suurempi aiemmin kuvatuista syistä johtuen. On kuitenkin syytä huomata, että ratapölkyn alapuolelta mitattuna lämpötila on oletettavasti hieman korkeampi kuin aivan tukikerroksen pinnassa ratapölkkyjen välissä. Näin ollen tukikerroksen yläpinnan pakkasumma saattaa olla hieman suurempi kuin kuvassa 4.15 esitetty, sillä lähteestä (Johansen 1982) ei käy ilmi, onko em. lämpötilaero ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen yläpinnan välillä otettu mallinnuksessa huomioon.



Kuva 4.15. Ilman pakkasumman ja tukikerroksen yläpinnassa 5 cm lumikerroksen alla vaikuttavan pakkasumman vertailu lämpötilamittausten pohjalta tehdyn mallinnusten perusteella, kun 1) rakenteessa on 10 cm eristelevy, 2) rakenteessa on 5 cm eristelevy, 3) rakenne on eristämätön (Johansen 1982).

Nykyisin Norjan rautateillä käytettävässä routamitoitusmenettelyssä maan pinnan ja ilman lämpötilaero on huomioitu siten, että mitoittavana pakkasmääränä käytetään ilman pakkasmäärää, johon on lisätty 5000-6000 h °C. Käytäntö on sama niin eristetyssä kuin eristämättömässäkin rakenteessa. Mitoittavan ilman pakkasmäärän tilastollinen toistumistiheys valitaan taulukosta 4.10 rataosan mitoitusnopeuden perusteella (Jernbaneverket 1999). Suomessa ilman ja maan pinnan pakkasmäärän eroa ei mitoituksessa huomioida. Mitoituspakkasmäärän tilastollinen toistumistiheys valitaan taulukosta 4.11 radan alusrakenneluokan perusteella (Ratahallintokeskus 1999b). Taulukoista voidaan todeta, että kaikkein tärkeimpien rataosien ($V_{\text{dim}} \geq 125 \text{ km/h}$)

routamitoituksessa Norjassa käytettävän pakkasmäärän tilastollinen toistumistodennäköisyys on melko selvästi pienempi kuin Suomessa.

Taulukko 4.10. Mitoittavan ilman pakkasmäärän valinta Norjan rautateiden routamitoituksessa. Mitoittavaan ilman pakkasmäärään lisätään 5000-6000 h °C johtuen maan pinnan ja ilman lämpötilaerosta pakkaskaudella. (Jernbaneverket 1999)

| Radan luokka | Mitoittava nopeus, V_{dim} | Mitoittava ilman pakkasmäärä, F_d |
|--------------|--|-------------------------------------|
| K0 - K1 | $V_{dim} \geq 125 \text{ km/h}$ | F_{100} |
| K2 - K4 | $45 \text{ km/h} \leq V_{dim} \leq 120 \text{ km/h}$ | F_{20} |
| K5 - | $V_{dim} \leq 40 \text{ km/h}$ | F_{10} |

Taulukko 4.11. Mitoittavan ilman pakkasmäärän valinta Suomen rautateiden routamitoituksessa. (Ratahallintokeskus 1999b)

| Radan alusrakenneluokka | Mitoittava ilman pakkasmäärä, F_d | |
|-------------------------|-------------------------------------|------------|
| | Ratalinja | Vaihdealue |
| 0 | F_5 | F_{20} |
| 1 | F_{20} | F_{50} |
| 2 - 4 | F_{50} | F_{50} |

5. ROUTAMITOITUSLASKELMAT

5.1 Lähtökohdat mitoituslaskelmille

5.1.1 Laskelmien tavoite

Mitoituslaskelmien tavoitteena oli tarkastella kahdella kappaleessa 3 esitetyllä mitoitusmenetelmällä saatavia eroja roudansyvyyksissä sekä laskelmien suhdetta nykyiseen mitoitusohjeeseen. Laskelmissa tarvittavien parametrien arvot valittiin kappaleessa 4 esitettyjen selvitysten perusteella. Laskentamenetelmien herkkyyttä eri parametreille arvioitiin herkkyytstarkasteluissa, joissa tavoitteena oli arvioida routamitoituksessa tarvittavien lähtöarvojen merkittävyyttä mitoituksen lopputuloksen kannalta. Pyrkimyksenä oli selvittää ne lähtöarvot, joiden määrittäminen olisi tapauskohtaisesti tarpeellista sekä ne lähtöarvot, jotka vähäisen merkityksensä takia voitaisiin vakioida käytännön routamitoituksessa. Tarkastelujen perusteella luotiin uusi ratarakenteen routamitoituksessa käytettäväksi soveltuva mitoitusohje.

5.1.2 Laskelmiin valitut mitoitusmenetelmät

Mitoituslaskelmat tehtiin kahdella kappaleessa 3.1 esitellyllä roudan syvyyden mitoitusmenetelmällä; yhdistetyllä Watzingerin, Kindemin, Michelsenin ja Beskowin (myöh. Beskowin) menetelmällä (ks. kappale 3.1.6) sekä Skaven-Haugin – Watzingerin (myöh. Skaven-Haugin) menetelmällä (ks. kappale 3.1.7). Koska tarkastelun alla oli ratarakenne erityisesti, laskelmat sovellettiin kerrokselliseen rakenteeseen kappaleessa 3.1.8 esitetyn mukaisesti.

Roudan syvyyden laskennassa käytettiin iteroitavaa kaavaa 5-1, jonka termit q_i (maakerroksen i lämpösisältö) ja F_{red} (sulana pysyvän maan jäähtymislämmöllä redusoitu pakkasmäärä) määritetään kaavoista 5-2 – 5-5.

$$z_f = \sum_{i=1}^{n-1} d_i - \lambda_{fn} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_{fi}} + \sqrt{\lambda_{fn}^2 \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \right)^2 + \frac{2\lambda_{fn}}{q_n} \left(F_{red} - \sum_{i=1}^{n-1} \left(q_i d_i \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{d_j}{\lambda_{fj}} + \frac{d_i}{2\lambda_{fi}} \right) \right) \right)} \quad (5-1)$$

- z_f = roudan kokonaissyvyys, m
- d_i = jäätyvän kerroksen i paksuus, m
- n = jäätyvien kerrosten lukumäärä, alin jäätyvä kerros
- λ_{fn} = alimman jäätyvän kerroksen n lämmönjohtavuus jäätyneenä, W/Km
- λ_{fi} = jäätyneen kerroksen i lämmönjohtavuus jäätyneenä, W/Km
- q_i = jäätyvän kerroksen i lämpösisältö, Wh/m^3
- F_{red} = sulana pysyvän maan jäähtymislämmöllä redusoitu pakkasmäärä, Kh

Merkittävin ero tarkasteluissa mitoitusmenetelmissä on tapa, jolla pakkaskauden aikana routarajalle virtaavaa sulan maan jäähtymislämpöä arvioidaan. Sulan maan jäähtymislämpö huomioidaan mitoituksessa mitoituspakkasmäärää redusoimalla kaavojen 5-2 tai 5-3 mukaisesti. Skaven-Haugin menetelmässä (kaava 5-2) sulan maan jäähtymislämmön arviointi perustuu empiirisiin mittauksiin, joihin nojautuen sulasta maasta

pakkaskauden aikana routarajalle virtaava jäähtymislämpö määritetään ilmasto-parametrien perusteella. Beskowin menetelmässä (kaava 5-3) sulasta maasta routaantumisen aikana vapautuva jäähtymislämpö lasketaan Fourierin lain nojalla sulan maan lämpötilagradienttiin perustuen. Molemmissa menetelmissä sulan maan jäähtymislämmön määrittämiseen sisältyy tiettyä epävarmuutta, mistä syystä eri menetelmillä tehtyjen roudansyvyyslaskelmien tuloksia on järkevää vertailla keskenään tuloksen luotettavuuden arvioimiseksi.

$$F_{red} = F - W_t \cdot Q_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \quad (\text{Skaven-Haug}) \quad (5-2)$$

$$F_{red} = F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_{fi}} \quad (\text{Beskow}) \quad (5-3)$$

- F = mitoittava pakkasmäärä, Kh
 W_t = Watzingerin luku, empiirinen korjauskerroin (ks. kuva 3.5)
 Q_0 = routarajalle sulasta maasta virtaava kokonaislämpömäärä, Wh/m^2
 S = lämpötilagradientin (G_+) ja roudan syvyyden (z_f) pakkaskauden aikaisen vaihtelun huomioonottava kokeellinen kerroin; yleensä keskimääräiseksi arvoksi oletetaan $S = 0,7$.
 G_+ = lämpötilagradientti routarajan alla, K/m
 t = pakkaskauden kesto, h
 λ_u = sulan maan lämmönjohtavuus, W/Km

Roudan syvyyden laskennassa (kaava 5-1) tarvittava maaperän lämpösisältö q_i määritetään Skaven-Haugin menetelmässä kaavalla 5-4 ja Beskowin menetelmässä kaavalla 5-5.

$$q_i = w \cdot \rho_{di} \cdot L_w \quad (\text{Skaven-Haug}) \quad (5-4)$$

$$q_i = w \cdot \rho_{di} \cdot L_w + C_{ui} \cdot T_u + 0,5 \cdot C_{fi} \cdot |T_f| \quad (\text{Beskow}) \quad (5-5)$$

- w = maakerroksen i vesipitoisuus paino-osina
 ρ_{di} = maakerroksen i kuivatiheys, kg/m^3
 L_w = veden jäätymislämpö, $\approx 93 Wh/kg$
 C_{ui} = sulan maakerroksen i tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m^3K
 T_u = maaperän lämpötila jäätymisprosessin alussa, $^{\circ}C$
 (oletus: T_u = vuotuinen ilman keskilämpötila)
 C_{fi} = jäätyneen maakerroksen i tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m^3K
 T_f = maan pinnan lämpötila jäätymisprosessin aikana, $^{\circ}C$
 (oletus: T_f = pakkaskauden keskilämpötila)

5.1.3 Laskennan perustaksi parametreille arvioidut oletusarvot

Laskelmien lähtökohdaksi routamitoitusparametreille valittiin kappaleessa 4 esitetyn kirjallisuusselvityksen perusteella oletusarvot, jotka on esitetty eri rakennekerroksille taulukossa 5.1. Tässä vaiheessa oletusarvoiksi valittiin nimenomaan tehdyn selvityksen perusteella todennäköiseksi arvioitu parametrin arvo, eli taulukossa 5.1 esitettyihin

oletusarvoihin ei sisällytetty varmuutta. Muiden roudan syvyyden laskennassa kaavoissa 5-1 – 5-5 tarvittavien parametrien määrittämismenetelmät on kootusti esitetty taulukossa 5.2.

*Taulukko 5.1. Roudansyvyyteen vaikuttaville parametreille kappaleen 4 perusteella arvioidut oletusarvot eri rakennekerroksissa. *) Mitoitettavia arvoja.*

| Parametri | Tukikerros | XPS-routalevy | Alusrakenne |
|--------------------|------------|---------------|-------------|
| $d [m]$ | 0,55 | *) | *) |
| $w[p. \%$] | 2 | 10 [til. %] | 6 |
| $\rho_d [kg/m^3]$ | 1600 | 40 | 1850 |
| $\lambda_f [W/Km]$ | 1,1 | 0,050 | 1,7 |
| $\lambda_u [W/Km]$ | 1,5 | | |
| $S [-]$ | 0,7 | | |

Taulukko 5.2. Roudan syvyyden laskennassa (kaavat 5-1 – 5-5) tarvittavien parametrien määrittäminen.

| Parametri | Määrittäminen | Menetelmä, jossa parametria tarvitaan |
|--------------------------|---------------------------|---|
| $C_u [Wh/m^3 K]$ | Lasketaan kaavalla 4-3 | Beskow |
| $C_f [Wh/m^3 K]$ | Lasketaan kaavalla 4-4 | Beskow |
| $G_+ [K/m]$ | Määritetään kuvasta 4.7 | Beskow |
| $T_u [^\circ C]$ | Määritetään kuvasta 4.13a | Beskow |
| $Wt [-]$ | Määritetään kuvasta 3.5 | Skaven-Haug |
| $Q_0 [Wh/m^2]$ | Määritetään kuvasta 3.5 | Skaven-Haug |
| $\theta_{va} [^\circ C]$ | Määritetään kuvasta 4.12a | Skaven-Haug (Q_0 :n ja Wt :n määrittämiseen) |
| $F [Kh]$ | Määritetään kuvasta 4.10 | Beskow, Skaven-Haug |
| $t [h]$ | Määritetään kuvasta 4.13b | Beskow |
| $T_f [^\circ C]$ | $T_f = F / t$ | Beskow |

Kuten taulukossa 5.1 on esitetty, alusrakennetta on laskelmissa käsitelty yhtenä kerroksena, vaikka alusrakenteen voidaan tavallisesti olettaa koostuvan ylemmästä sora- ja alemmasta hiekkakerroksesta. Taulukossa 5.1 esitetyt alusrakenteen materiaali-parametrien arvot on valittu taulukossa 5.3 kahdelle eri alusrakennekerrokselle arvioitujen arvojen pohjalta pyrkimyksenä keskimääräisen alusrakennemateriaalin kuvaaminen. Yksinkertaistukseen päätymistä puolsi vähäinen ero taulukossa 5.1 esitetylle yksi- ja taulukossa 5.3 esitetylle kaksikerroksiselle alusrakenteelle tehdyissä roudansyvyyslaskelmissa.

Taulukko 5.3. Yksi- ja kaksikerroksisen alusrakenteen vertailussa käytetyt arvot kaksikerroksisen alusrakenteen parametreille.

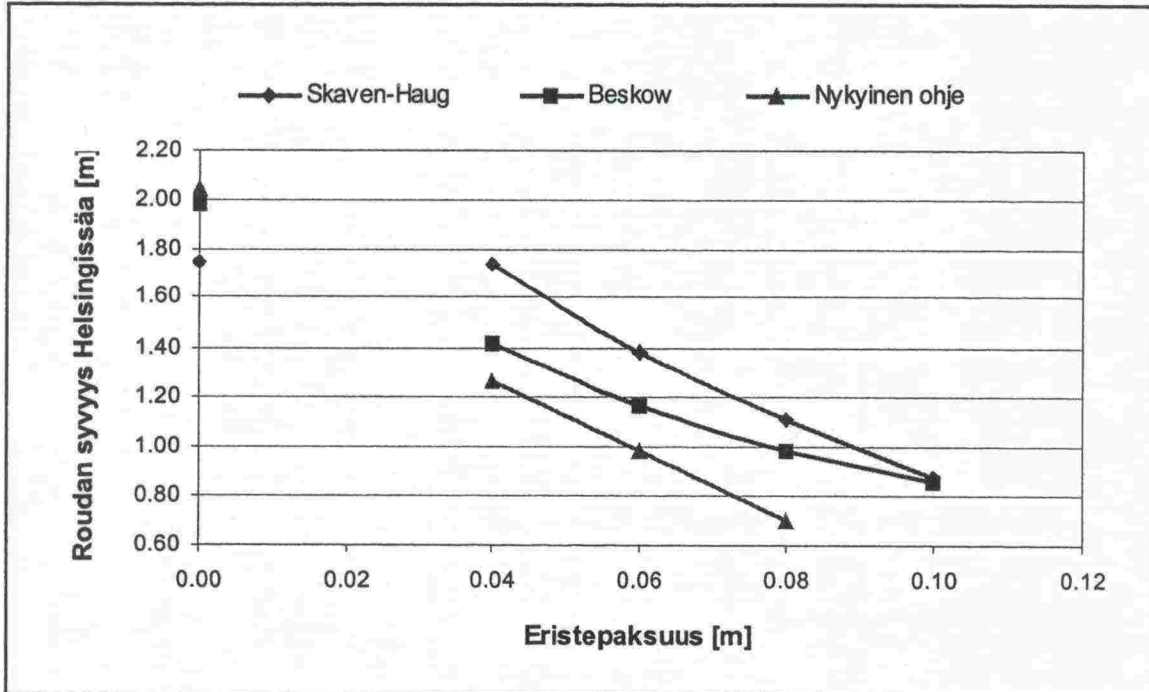
| Parametri | Alusrakennekerros 1 ("sora") | Alusrakennekerros 2 ("hiekk") |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|
| $w[p. \%$] | 5 | 8 |
| $\rho_d [kg/m^3]$ | 1900 | 1750 |
| $\lambda_f [W/Km]$ | 1,6 | 1,7 |

5.2 Laskentamenetelmien vertailu ja tulosten suhde nykyiseen mitoitusohjeeseen eri paikkakunnilla

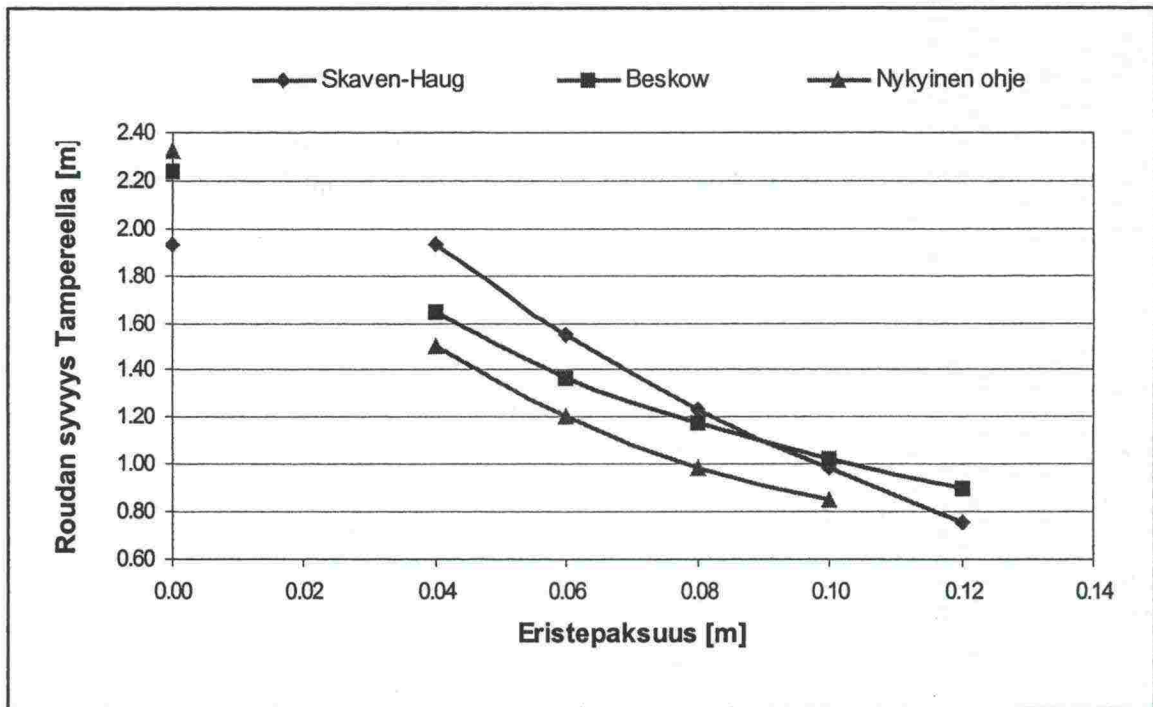
Skaven-Haugin ja Beskowin menetelmiä vertailtiin laskemalla roudan syvyydet kummallakin menetelmällä taulukossa 5.1 esitettyjä oletusarvoja käyttäen neljällä eri paikkakunnalla; Helsingin, Tampereen, Jyväskylän ja Oulun seuduilla. Tulokset niin eristämättömälle kuin routalevyllä eristetylle rakenteelle on esitetty kuvissa 5.1 – 5.4. Kuviin on piirretty myös tähän saakka käytössä olleen mitoitusdiagrammin mukaiset arvot. Eri kaupunkien kohdalla käytetyt ilmastoparametrien arvot on esitetty taulukossa 5.4. Eristetylle rakenteelle tehdyissä laskelmissa routalevyn paksuudesta on vähennetty 10 mm, jota käytetään kuvastamaan sepelirakeiden painautumisen levyyn aiheuttamaa ohenemaa.

Taulukko 5.4. Roudansyvyyslaskelmissa eri paikkakunnilla käytetyt ilmastoparametrien arvot.

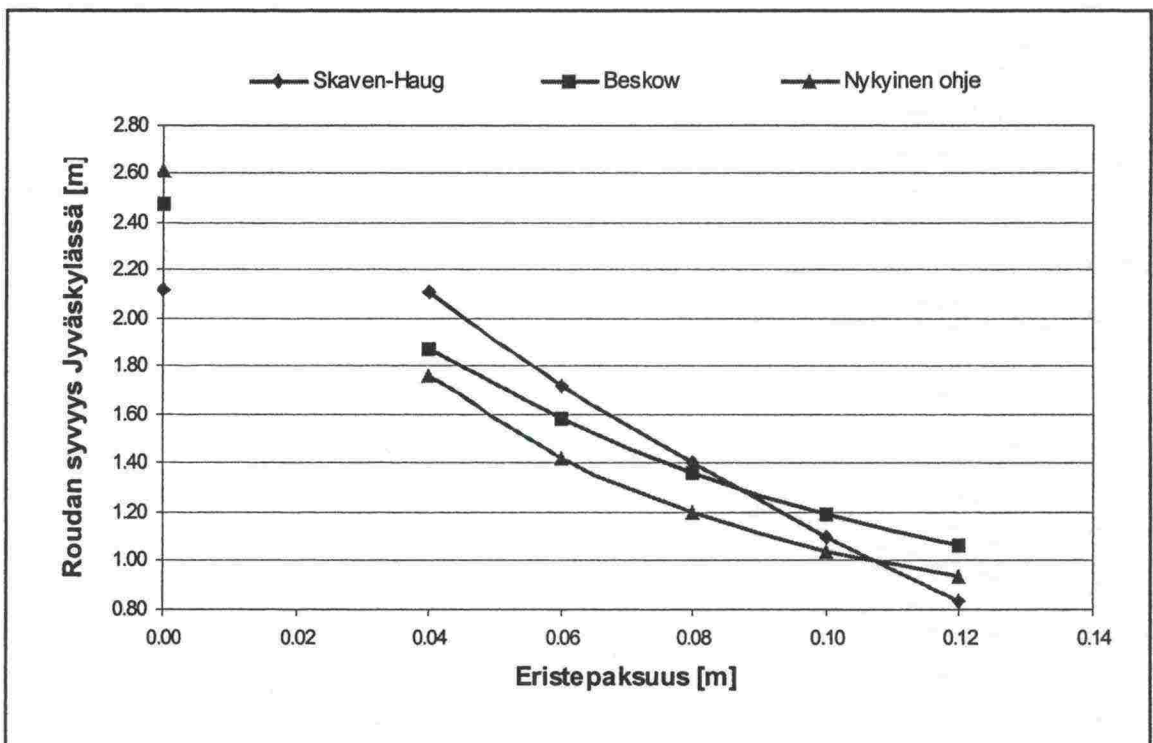
| Parametri | Helsinki | Tampere | Jyväskylä | Oulu |
|--|----------|---------|-----------|-------|
| Mitoittava pakkasmäärä: F_{50} (Kh) | 36000 | 42000 | 48500 | 54500 |
| Pakkaskauden kesto: t (d) | 132 | 145 | 154 | 166 |
| Ilman vuotuinen keskilämpötila: T_u (°C) | 4,5 | 3,3 | 2,8 | 1,4 |
| Lämpötilagradientti routarajan alla: G_+ (K/m) | 3,4 | 3,0 | 2,7 | 2,0 |
| Talven lämpötila-amplitudi: θ_{va} (°C) | 19 | 20 | 21 | 21 |



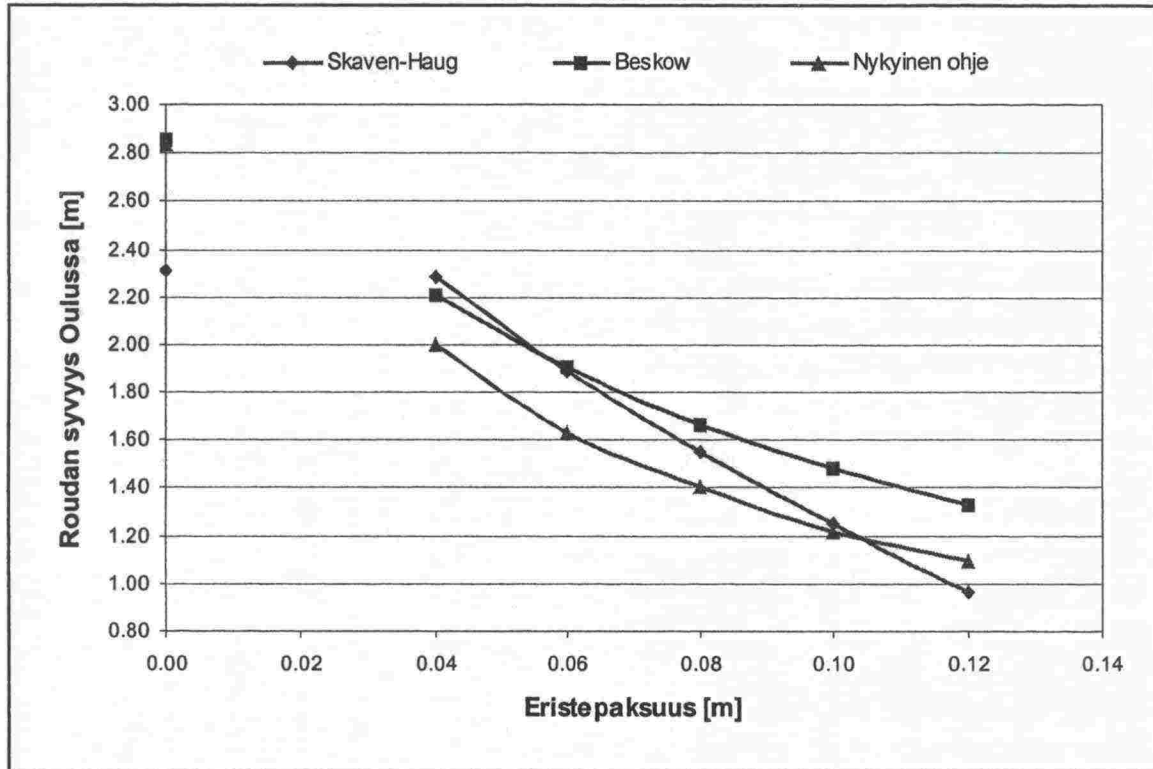
Kuva 5.1. Roudan syvyys Skaven-Haugin ja Beskowin menetelmillä laskettuna sekä nykyisen mitoitusohjeen mukaan eristämättömässä ja eristetyssä ratarakenteessa Helsingin seudulla.



Kuva 5.2. Roudan syvyys Skaven-Haugin ja Beskowin menetelmillä laskettuna sekä nykyisen mitoitusohjeen mukaan eristämättömässä ja eristetyssä ratarakenteessa Tampereen seudulla.



Kuva 5.3. Roudan syvyys Skaven-Haugin ja Beskowin menetelmillä laskettuna sekä nykyisen mitoitusohjeen mukaan eristämättömässä ja eristetyssä ratarakenteessa Jyväskylän seudulla.



Kuva 5.4. Roudan syvyys Skaven-Haugin ja Beskowin menetelmillä laskettuna sekä nykyisen mitoitusohjeen mukaan eristämättömässä ja eristetyssä ratarakenteessa Oulun seudulla.

Kuvissa 5.1 – 5.4 esitettyjen laskentatulosten perusteella Skaven-Haugin menetelmällä laskettu roudan syvyys *eristämättömässä* rakenteessa on huomattavasti pienempi kuin Beskowin menetelmällä laskettu roudan syvyys. Ero Helsingin seudulla on noin 12 % ja kasvaa pohjoisemmaksi mentäessä ollen Oulun seudulla noin 19 %. Mainitut suhteelliset erot vastaavat 23 – 44 cm. Nykyinen mitoitusohje johtaa *eristämättömässä* rakenteessa Beskowin menetelmällä laskettuun roudan syvyyteen nähden varsin yhtenevään tulokseen, ylimitoitusta on laskettuun verrattuna neljällä paikkakunnalla keskimäärin vain noin 3 %. Sen sijaan Skaven-Haugin menetelmällä saatuihin tuloksiin verrattuna mitoitusohje sisältää *eristämättömässä* rakenteessa ylimitoitusta 15 – 20 %. Niinpä Skaven-Haugin ja Beskowin menetelmillä parametrien oletusarvoja käyttäen laskettujen roudan syvyyksien nojalla voidaan todeta, että *eristämättömän* rakenteen osalta nykyisessä mitoitusohjeessa ei ole alimitoitusta.

Eristetylle rakenteelle tehtyjä laskelmia tarkasteltaessa havaitaan, että Skaven-Haugin menetelmä on epäjohtonmukainen ainakin pienillä, alle 50 mm eristepaksuuksilla, sillä sen mukaan laskettu roudan syvyys *eristämättömässä* ja 40 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa on likimäärin yhtä suuri (ks. kuvat 5.1 – 5.4). Alle 40 mm eristepaksuuksilla päädytään jopa huomattavasti *eristämättömän* rakennetta suurempiin roudan syvyyksiin. Skaven-Haugin menetelmän mukaisen laskennan luotettavuutta onkin syytä pohtia etenkin *eristämättömässä* ja alle 40 mm eristeellä eristetyssä rakenteessa.

Eristetyssä rakenteessa pienillä eristepaksuuksilla laskettu roudan syvyys on Skaven-Haugin menetelmän mukaan suurempi kuin Beskowin menetelmän mukaan (ks. kuvat 5.1 – 5.4). Näin siis siitä huolimatta, että *eristämättömässä* rakenteessa tilanne on selvästi päinvastainen. Eristepaksuuden lisäyksen vaikutus roudan syvyyteen on Skaven-Haugin menetelmässä suurempi kuin Beskowin menetelmässä. Niinpä

suuremmilla eristepaksuuksilla menetelmillä saatavat tulokset lähenevät toisiaan ja tietyssä vaiheessa eristepaksuuden edelleen kasvaessa tilanne kääntyy vastakkaiseksi.

Verrattaessa *eristetyssä* rakenteessa laskettuja roudan syvyyksiä voimassa olevasta mitoitusohjeesta saataviin arvoihin voidaan kummallakin menetelmällä lasketut roudan syvyydet näiltä osin todeta pääsääntöisesti ohjeen arvoja suuremmiksi. Erot johtuvat suurelta osin XPS-routalevyn mitoituslämmönjohtavuudesta, jona ohjetta laadittaessa on käytetty arvoa $0,037 \text{ W/Km}$, kun taas nyt tehdyissä laskelmissa on käytetty arvoa $0,050 \text{ W/Km}$ (ks. kappale 5.3.3 ja 4.4.4). Niinpä varsinaista alimitoitusta ei voida sanoa pitkällä aikavälillä tehdyn, sillä mitoituslämmönjohtavuuden korottaminen johtuu pääasiassa levyn valmistusmenetelmässä muutamia vuosia sitten tapahtuneen muutoksen myötä kasvaneesta uuden levyn lämmönjohtavuudesta.

Etenkin kuvissa 5.2 – 5.4 esitettyjen Beskowin menetelmän sekä nykyisen mitoitusohjeen roudansyvyys-eristepaksuus -kuvaajien samankaltaisen muodon perusteella voidaan olettaa nykyisen mitoitusohjeen laadinnassa käytetyn Beskowin menetelmää.

5.3 Laskentamenetelmien herkkyyksi eri parametreille

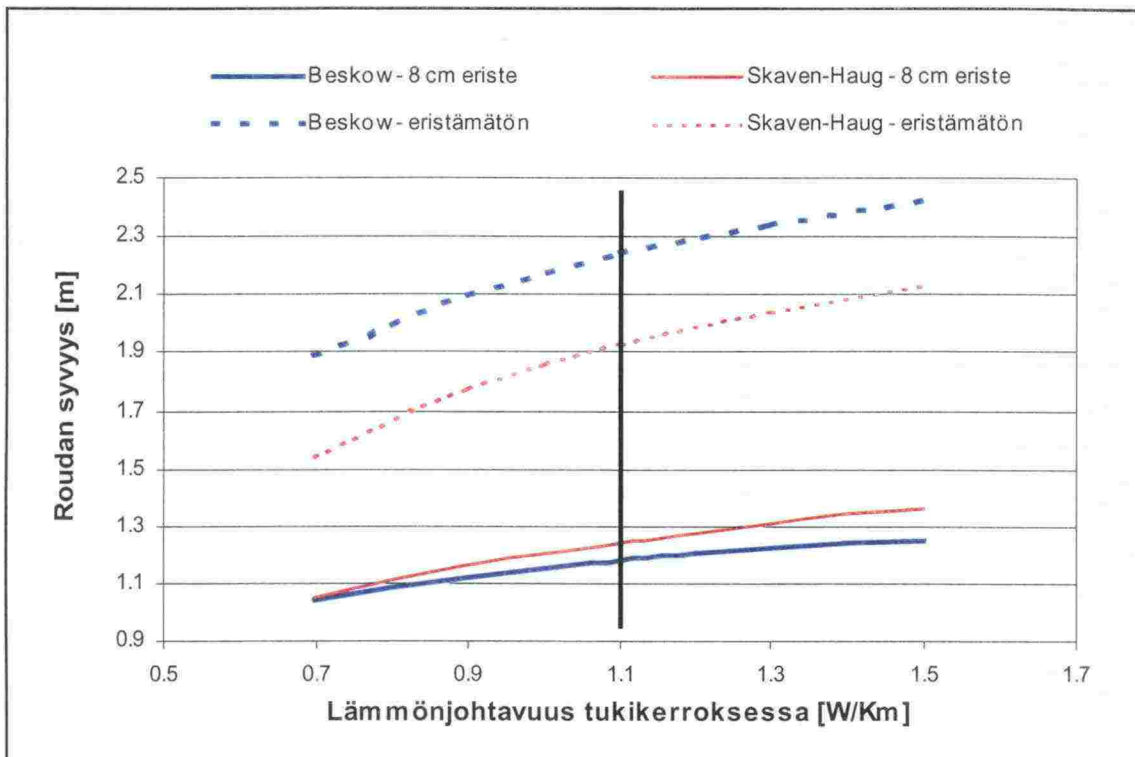
5.3.1 Yleistä

Roudan syvyyden herkkyyttä eri muuttujille arvioitiin sekä Skaven-Haugin että Beskowin menetelmillä tehdyillä laskelmilla. Tarkastelut tehtiin Tampereen ilmastolosuhteissa. Laskelmien lähtökohtana oli taulukossa 5.1 materiaaliparametreille esitetyt arvot sekä taulukossa 5.4 ilmastoparametreille Tampereella esitetyt arvot. Tarkasteluja tehtiin sekä eristämättömällä että routalevyllä eristetyllä rakenteella. Eristetylle rakenteelle tehdyissä laskelmissa routalevyn paksuudesta vähennettiin 10 mm kuvastamaan sepelirakeiden painautumisen levyyn aiheuttamaa ohenemaa. Mitoittavana pakkasmääränä käytettiin tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvaa ilman pakkasmäärää.

5.3.2 Herkkyyksi tukikerroksen materiaaliparametreille

Tukikerroksen vesipitoisuuden ja kuivatiheyden merkitys roudan syvyyteen oli lähes olematon tarkastellulla vaihtelualueella, joka vesipitoisuuden osalta oli 0–6 painoprosenttia ja kuivatiheyden osalta $1300\text{--}1800 \text{ kg/m}^3$.

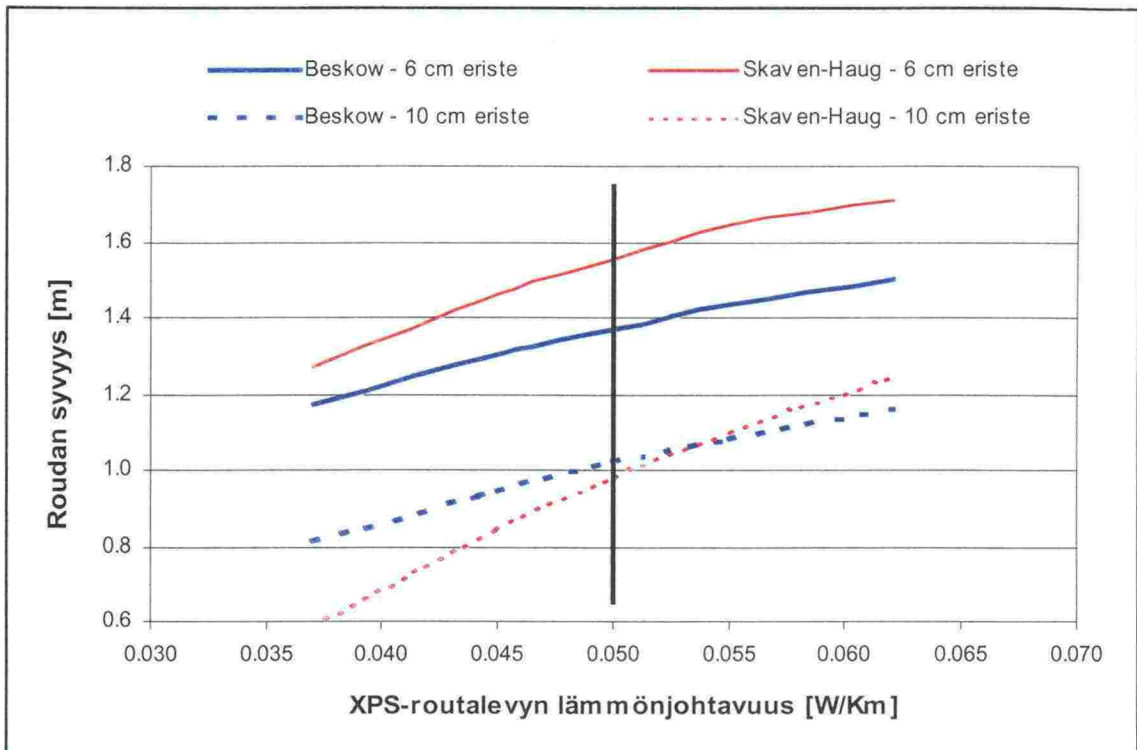
Sen sijaan tukikerroksen mitoituslämmönjohtavuus vaikuttaa mitoittettavaan roudan syvyyteen, kuten kuvasta 5.5 nähdään. Vaikutus korostuu hieman eristämättömässä rakenteessa, jossa suuruudeltaan $0,1 \text{ W/Km}$ muutos lämmönjohtavuudessa vaikuttaa roudan syvyyteen 3–4 %. Lämmönjohtavuuden lisäksi luonnollisesti kasvattaa roudan syvyyttä.



Kuva 5.5. Roudansyvyyslaskelmien herkkyys tukikerroksen lämmönjohtavuudelle eristämättömässä ja 80 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa laskettuna sekä Skaven-Haugin että Beskowin menetelmällä. Lämmönjohtavuuden oletusarvo on 1,1 W/Km. Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteissa.

5.3.3 Herkkyys XPS-routalevyn lämmönjohtavuudelle

XPS-routalevyn osalta roudan syvyyteen olennaisesti vaikuttava parametri on levyn lämmönjohtavuus. Kuvassa 5.6 on tarkasteltu XPS-routalevyn mitoituslämmönjohtavuuden vaikutusta roudan syvyyteen kahdella eri eristepaksuudella. Kuvasta on nähtävissä, että Skaven-Haugin menetelmässä eristeen lämmönjohtavuuden vaikutus roudan syvyyteen on suurempi kuin Beskowin menetelmässä, ja että Skaven-Haugin menetelmässä vaikutus korostuu eristepaksuuden ohetessa. Kuvan perusteella voidaan todeta myös, että routalevyn mitoituslämmönjohtavuuden nostaminen tähän saakka käytetystä 0,037 W/Km:sta tämän selvityksen (ks. kappale 4.4.4) nojalla esitettyyn 0,050 W/Km:iin lisää mitoittavaa roudan syvyyttä tarkastelluissa Tampereen alueen ilmasto-olosuhteissa Beskowin menetelmän mukaan noin 20 cm ja Skaven-Haugin menetelmän mukaan eristepaksuudesta riippuen 25-45 cm. Tämä selittää varsin hyvin kappaleen 5.2 esimerkkilaskelmissa esitetyn eron tähän saakka käytetyn mitoitusohjeen ja nyt 0,050 W/Km mitoituslämmönjohtavuutta käyttäen tehtyjen roudansyvyyslaskelmien välillä.



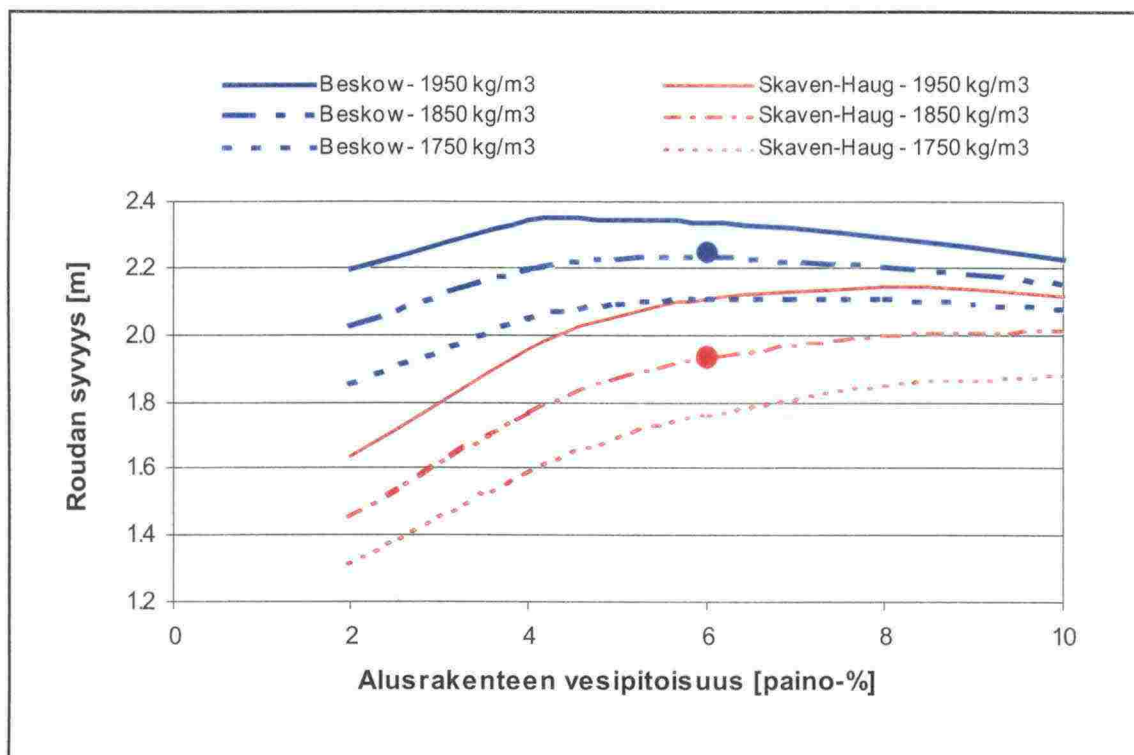
Kuva 5.6. Roudansyvyyslaskelmien herkkyys XPS-routalevyn lämmönjohtavuudelle 60 mm ja 100 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa laskettuna sekä Skaven-Haugin että Beskowin menetelmällä. Lämmönjohtavuuden oletusarvo on 0,050 W/Km. Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteissa.

5.3.4 Herkkyys alusrakenteen materiaaliparametreille

Tarkastelluissa laskentamenetelmissä roudan syvyyteen vaikuttavia alusrakenneparametrejä ovat vesipitoisuus, kuivatiheys ja lämmönjohtavuus. Vesipitoisuuden samoin kuin kuivatiheyden kasvaessa maaperän lämpösisältö lisääntyy, jolloin roudan syvyys pienenee. Toisaalta vesipitoisuuden ja kuivatiheyden kasvaessa lämmönjohtavuus suurenee, mikä vaikuttaa roudan syvyyttä lisäävästi. Oleellisinta parametrien arvojen valinnassa onkin, että arvot eivät ole keskenään ristiriidassa, eli että alusrakennekerroksen lämmönjohtavuus valitaan vesipitoisuudelle ja kuivatiheydelle asetettuja arvoja vastaavana. Kuvassa 5.7 on esitetty roudan syvyyden riippuvuus alusrakenteen vesipitoisuudesta ja kuivatiheydestä olettaen, että lämmönjohtavuus määräytyy vesipitoisuuden ja kuivatiheyden perusteella kaavan 4-7 mukaisesti.

Kuvan perusteella vesipitoisuuden, samoin kuin kuivatiheyden lisäys ehkä hieman yllättäenkin lisää roudan syvyyttä huolimatta alusrakenteen kasvavasta lämpösisällöstä. Tämä on seurausta vesipitoisuuden ja kuivatiheyden kasvun myötä kasvavasta lämmönjohtavuudesta, jonka merkitys on näin ollen kaavan 4-7 mukaisesti laskettuna roudan tunkeutumisen kannalta suurempi kuin kasvava lämpösisältö. Vesipitoisuuden osalta tämä pätee alle 6 % pitoisuuksilla, sillä vesipitoisuuden ylittäessä 6 % sen lisäyksestä aiheutuvan lämpösisällön kasvun vaikutus roudan syvyyteen on kuvan 5.7 perusteella likimäärin yhtä suuri, joissakin tapauksissa jopa hieman suurempi, kuin siitä seuraavan lämmönjohtavuuden kasvun vaikutus. Laskentamenetelmien välillä on herkkydessä

etenkin alle 6 % vesipitoisuuksilla huomattava ero, sillä Skaven-Haugin menetelmässä vesipitoisuuden lisäys 2 %:sta 4 %:iin lisää roudan tunkeutumissyvyyttä tarkastelluissa oloissa eristämättömässä rakenteessa noin 30 cm, kun vastaava lisäys Beskowin menetelmällä laskettuna on noin 15 cm. Kuivatiheyden osalta voidaan havaita 100 kg/m^3 lisäyksen lisäävän roudan syvyyttä tarkastelluissa olosuhteissa Beskowin menetelmällä laskettuna 10-15 cm ja Skaven-Haugin menetelmällä laskettuna 15-18 cm.



Kuva 5.7. Roudansyvyyslaskelmien (sekä Skaven-Haugin että Beskowin menetelmän) herkkyyseristämättömässä rakenteessa alusrakenteen vesipitoisuudelle ja kuivatiheydelle olettaen, että lämmönjohtavuus kerroksessa määräytyy vesipitoisuuden ja kuivatiheyden perusteella kaavasta 4-7. Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteissa. Pallot kuvaavat oletusarvotilannetta ($w = 6 \%$, $\rho_d = 1850 \text{ kg/m}^3$).

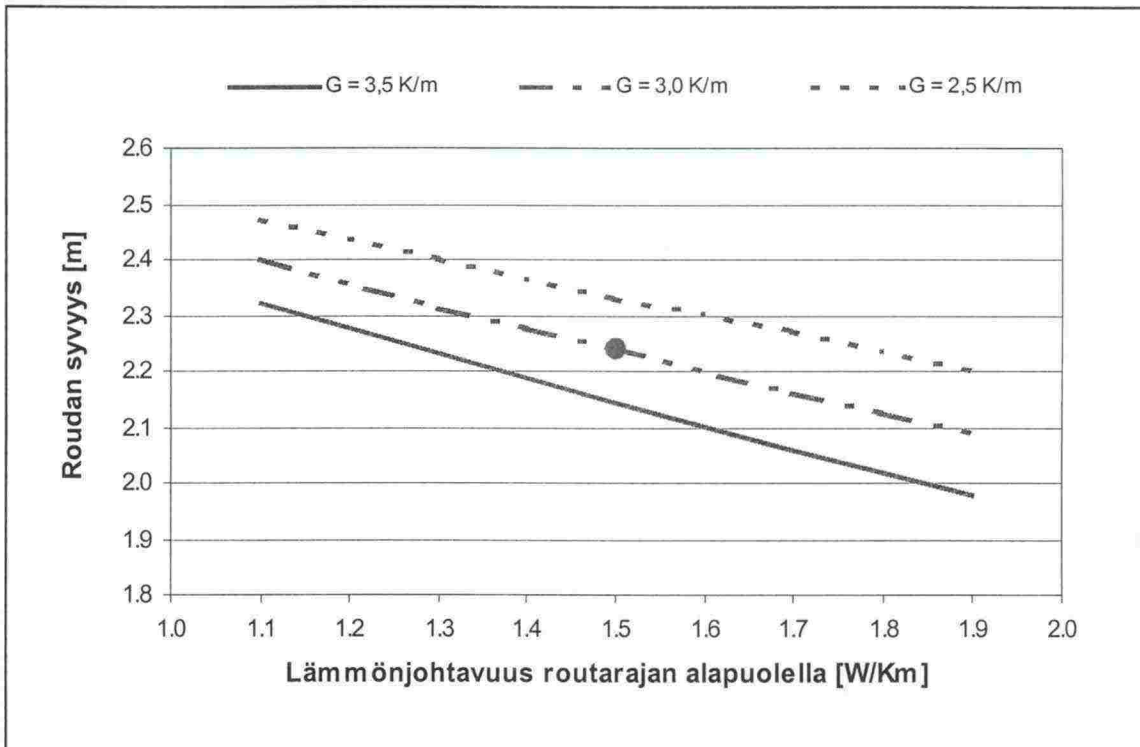
Käytettäessä radan alusrakennemateriaalina kalliomursketta RAMO 3:ssa on määrätty, että radan rakennepaksumuksia tulee lisätä 15 % tavanomaisen sora- tai hiekka-alusrakenteen omaavan, routimattomaksi mitoitettun rakenteen paksuudesta. Olettaen kalliomurskeen lämmönjohtavuuden riippuvuus vesipitoisuudesta ja kuivatiheydestä likimäärin vastaavaksi kuin karkearakeisilla luonnollisilla maamateriaaleilla voidaan kuvan 5.7 perusteella arvioida, että vaatimuksen myötä ei päädytä alimitoitukseen. Arviota tukee oletus kalliomurskealusrakenteen tavanomaista alusrakennetta alhaisemmasta vesipitoisuudesta. Kuivatiheyden voidaan arvioida kummassakin tapauksessa olevan likimäärin yhtä suuri.

Kalliomurskeesta rakennetun alusrakenteen routamitoitusparametrien arvoja on syytä tarkastella lähemmin sen jälkeen, kun on selvitetty vaatimukset, joilla varmistetaan murskemateriaalin säilyminen routimattomana ratarakenteen toistuvan mekaanisen kuormituksen sekä ympäristörasitusten alaisessa rankassa kuormitusympäristössä. Siihen saakka kalliomurskeesta rakennettujen alusrakenteiden 15 % lisäpaksumusvaatimus on perusteltu.

5.3.5 Herkkyys sulan maan lämmönjohtavuudelle, lämpötilagradientille sekä vuotuiselle ilman keskilämpötilalle

Beskowin menetelmässä sulasta maasta routarajalle virtaavaa lämpömäärää arvioidaan Fourierin lain nojalla, jolloin lämpövirta lasketaan sulan maan lämmönjohtavuuden ja vallitsevan lämpötilagradientin tulona (ks. kappale 2.2.2). Skaven-Haugin menetelmässä näitä parametreja ei tarvita.

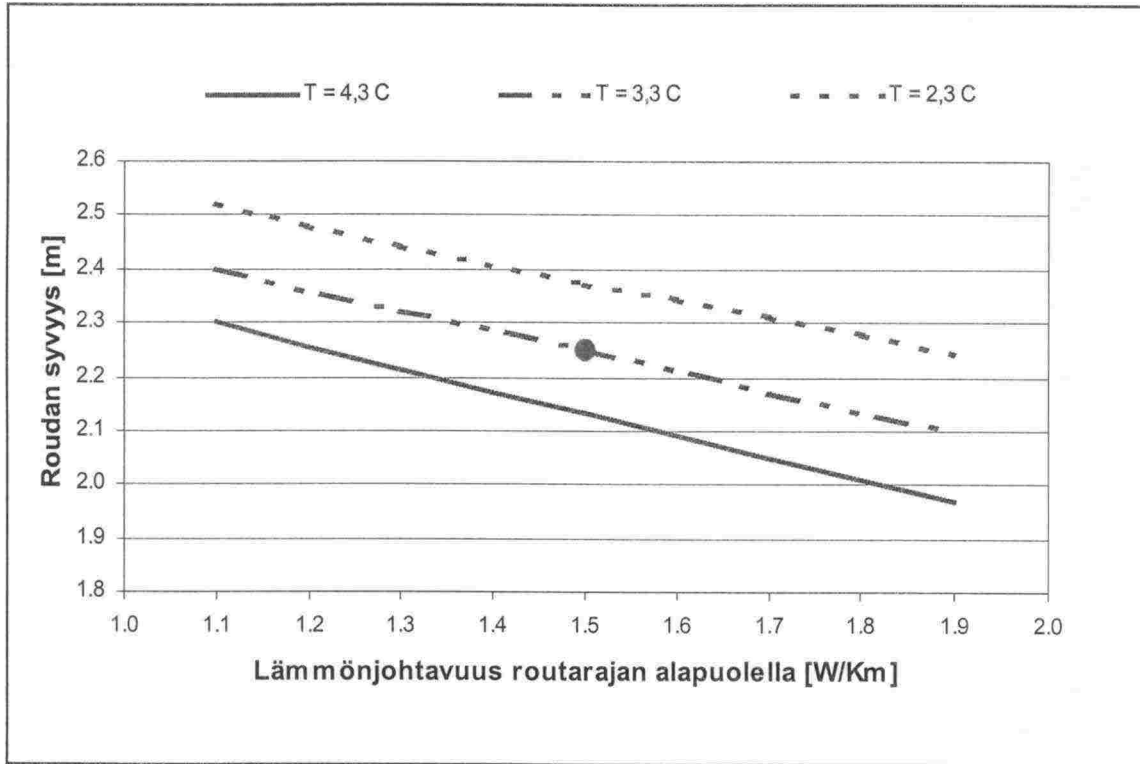
Routarajan alapuolisen maan lämmönjohtavuus vaikuttaa Beskowin menetelmällä laskettuun roudan syvyyteen Tampereen ilmasto-oloissa siten, että $0,1 \text{ W/Km}$ lisäys lämmönjohtavuudessa pienentää Fourierin lain mukaisesti lasketun roudan syvyyttä noin 4 cm. Suuruudeltaan $0,5 \text{ K/m}$ lisäys routarajan alapuolella vallitsevassa lämpötilagradientissa pienentää roudan syvyyttä noin 10 cm. Molempien parametrien kohdalla vaikutus on sama sekä eristetyssä että eristämättömässä rakenteessa. Beskowin menetelmän herkkyys sulan maan lämmönjohtavuudelle ja lämpötilagradientille on esitetty kuvassa 5.8.



Kuva 5.8. Beskowin roudan syvyyden laskentamenetelmän herkkyys eristämättömässä rakenteessa sulan maan lämmönjohtavuudelle ja lämpötilagradientille. Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteissa, jolloin oletusarvot ovat: $G_+ = 3,0 \text{ K/m}$ ja $\lambda_u = 1,5 \text{ W/Km}$. Pallo kuvaa oletusarvotilannetta.

Tehdyissä Beskowin menetelmän mukaisissa tarkasteluissa tarvittava lämpötilagradientti määritettiin kaavalla 4-13 (kuva 4.7) paikkakunnan vuotuisen ilman keskilämpötilan perusteella. Näin ollen menetelmän herkkyyttä lämpötilagradientille voidaan kuvata herkkyytenä vuotuiselle ilman keskilämpötilalle, kuten kuvassa 5.9 on tehty.

Vuotuista ilman keskilämpötilaa käytetään Beskowin menetelmässä myös kuvaamaan maaperän lämpötilaa pakkaskauden alkaessa, joten sitä tarvitaan maan lämpösisällön arvioinnissa. Herkkyystarkastelujen perusteella ilman keskilämpötilan vaikutus roudan syvyyteen maan lämpösisällön kautta on vähäinen, sillä 10 prosentin muutos oletusarvoihin aikaansaa alle 1 prosentin muutoksen roudan syvyyteen.



Kuva 5.9. Beskowin roudan syvyyden laskentamenetelmän herkkyys eristämättömässä rakenteessa sulan maan lämmönjohtavuudelle ja vuotuiselle ilman keskilämpötilalle (T), kun routarajan alla vallitseva lämpötilagradientti oletetaan määräytyvän kaavan 4-13 perusteella. Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-oloissa, jolloin oletusarvot ovat: $T = 3,3\text{ °C}$ ja $\lambda_u = 1,5\text{ W/Km}$. Pallo kuvaa oletusarvotilannetta.

Vuotuisen ilman keskilämpötilan vaikutus Beskowin menetelmällä laskettuun roudan syvyyteen on siis sulan maan lämpötilagradienttiin vaikuttavana tekijänä huomattava, eikä sitä voida tarkkuuden merkittävästi kärsimättä mitoituksessa vakioida. Myöskään keskilämpötilan sitominen pakkasmäärään ei ole mahdollista, jos mitoituksessa käytetään eri toistumisaikavälin omaavia pakkasmääriä. Tällöinhän tilanne voisi olla esimerkiksi se, että Oulun (F_5) ja Helsingin (F_{50}) seuduilla mitoittava pakkasmäärä olisi sama, mutta keskilämpötilassa on $2,5\text{ °C}$ ero, mikä kuvan 5.9 perusteella johtaisi noin 30 cm eroon roudan syvyydessä.

5.3.6 Herkkyys pakkaskauden kestolle

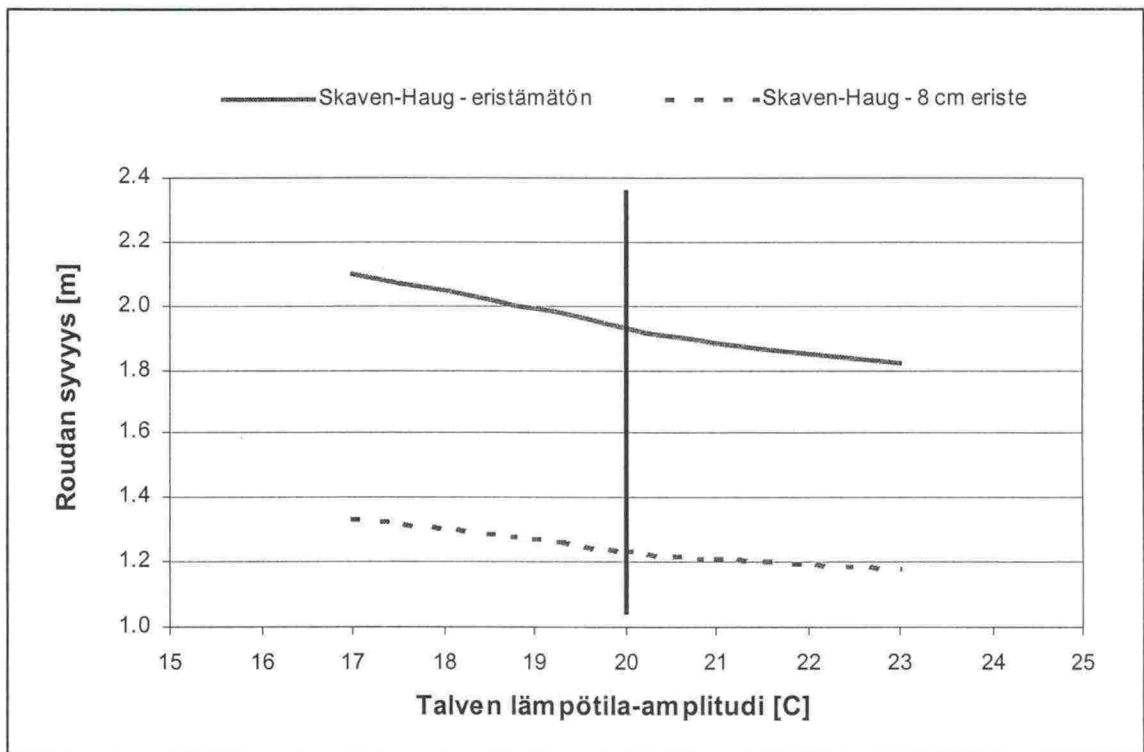
Pakkaskauden kesto on Beskowin menetelmässä tarvittava parametri arvioitaessa sulasta maasta routarajalle pakkaskauden aikana virtaavaa lämpö määrää. Yhdessä pakkassumman kanssa pakkaskauden kesto määrää pakkaskauden keskilämpötilan, jota käytetään Beskowin mallissa kuvaamaan maanpinnan lämpötilaa pakkaskauden aikana, ja tarvitaan siten maaperän lämpösisällön arvioimiseen.

Tehtyjen tarkastelujen perusteella Beskowin menetelmän mukaisen roudan syvyyden laskennan herkkyys pakkaskauden kestolle on vähäinen, sillä 10 % muutos oletusarvossa aikaansaa alle 1 % muutoksen roudan syvyyteen.

5.3.7 Herkkyys talven lämpötila-amplitudille

Talven lämpötila-amplitudilla tarkoitetaan vuoden keskilämpötilan ja kylmimmän kuukauden keskilämpötilan erotusta ja sitä käytetään Skaven-Haugin menetelmässä empiiristen parametrien, routarajalle virtaavan kokonaislämpömäärän ja Watzingerin luvun määrittämiseen. Beskowin laskentamenetelmässä talven lämpötila-amplitudia ei tarvita.

Tarkastelluissa Tampereen alueen ilmasto-olosuhteissa talven lämpötila-amplitudin muutos 20 °C:sta (oletusarvo) 18 °C:een lisää Skaven-Haugin laskentamenetelmän mukaan roudan syvyyttä noin 5 % sekä eristämättömässä että 8 cm routalevyllä eristetyssä rakenteessa (kuva 5.10). Kappaleessa 5 esitetyissä herkkyystarkasteluissa talven lämpötila-amplitudi on määritetty kuvasta 4.12a, eli pakkassumman ja vuotuisen ilman keskilämpötilan perusteella.



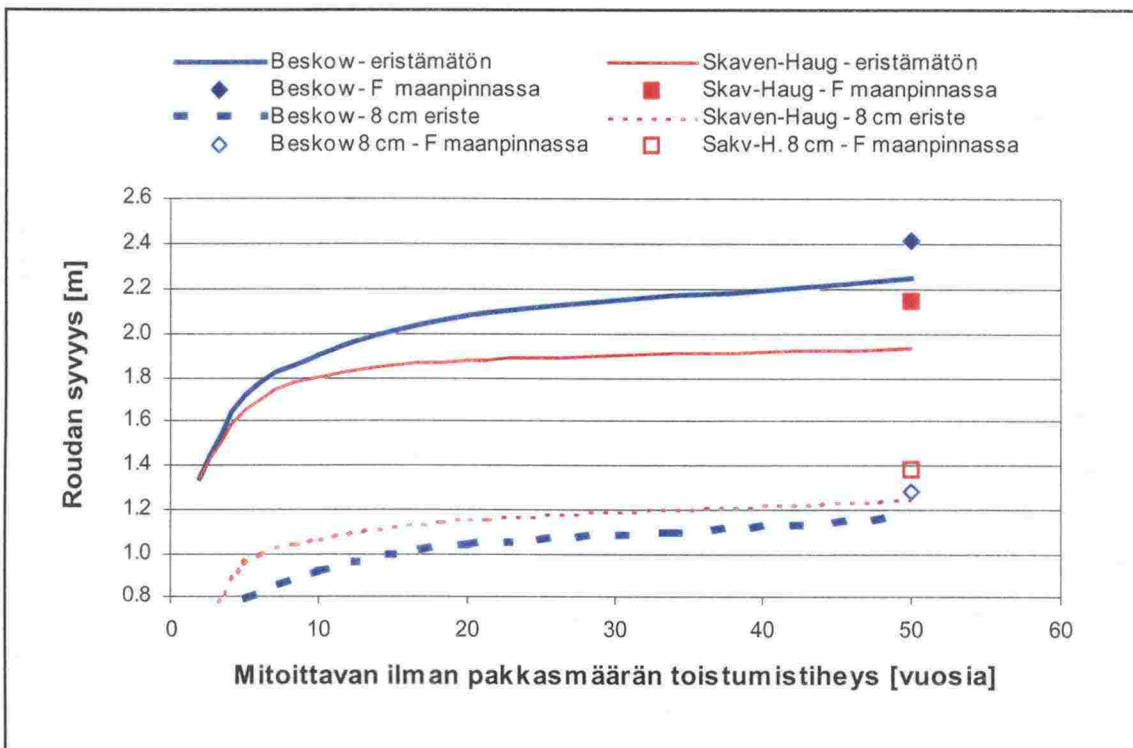
Kuva 5.10. Skaven-Haugin roudan syvyyden laskentamenetelmän herkkyys talven lämpötila-amplitudille eristämättömässä ja 8 cm routalevyllä eristetyssä rakenteessa. Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteissa, jolloin talven lämpötila-amplitudin oletusarvona on: $\theta_{va} = 20$ °C.

Koska pakkasmäärän lisäys suurentaa talven lämpötila-amplitudia ja sitä kautta välillisesti kuvan 5.10 perusteella pienentää roudan syvyyttä, talviampitudin tai ainakin sen kuvan 4.12a mukaisen määrittämistavan voidaan todeta olevan Skaven-Haugin menetelmässä huomion arvoinen kohta, käytetäänhän kuvassa 4.12a keskimääräiseen

pakkassummaan nähden suurta, pääsääntöisesti kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkassummaa.

5.3.8 Herkkyys mitoittavan pakkassumman toistumistiheydelle

Tähän saakka käsitellyissä tarkasteluissa mitoittavana pakkassummana on käytetty tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvaa ilman pakkassummaa. Kuvassa 5.11 on esitetty laskentatuloksen riippuvuus mitoittavan pakkasmäärän toistumistiheydestä Tampereen alueella. Tarkasteluissa on oletettu, että pakkaskauden kesto ja vuoden keskilämpötila samoin kuin sulassa maassa vaikuttava lämpötilagradientti eivät muutu pakkasmäärän muuttuessa. Sen sijaan pakkasmäärän muutoksen vaikutus talven lämpötila-amplitudiin ja sitä kautta routarajalle sulasta maasta virtaavaan kokonaislämpömäärään ja Watzingerin lukuun on Skaven-Haugin menetelmällä tehdyissä tarkasteluissa huomioitu.



Kuva 5.11. Mitoittavan pakkasmäärän toistumistiheyden vaikutus roudansyvyyyteen laskettuna sekä Skaven-Haugin että Beskowin menetelmällä eristämättömässä ja 8 cm routalevyllä eristetyssä rakenteessa. Yksittäiset pisteet kuvaavat laskentatuloksia, joissa pakkasmääränä on käytetty rakenteen pinnassa vaikuttavaksi oletettua pakkasmäärää $F_{50} + 5000 \text{ Kh}$ (vrt. kappale 4.9). Tarkastelut on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteissa.

Kuvasta 5.11 nähdään, että mitoittavan pakkasmäärän toistumistiheyden valinta vaikuttaa roudan syvyyteen Beskowin menetelmässä enemmän kuin Skaven-Haugin menetelmässä. Skaven-Haugin menetelmällä laskettuna vaikutus on itse asiassa hämmästyttävän vähäinen, sillä sen mukaan ero roudan syvyydessä kerran 10 ja kerran 50 vuodessa toistuvalla pakkasmäärällä eristämättömässä rakenteessa on ainoastaan 13 cm. Vastaava ero Beskowin menetelmällä laskettuna on 34 cm. Taajemmin kuin kerran kymmenessä vuodessa toistuvilla pakkasmäärillä toistumistiheyden vaikutus

roudan syvyyteen luonnollisesti korostuu huomattavasti laskentamenetelmästä riippumatta.

Kuvasta 5.11 ilmenee lisäksi kappaleessa 4.9 esitetyn mukaisen maan pinnan ja ilman pakkasmääräeron vaikutus roudan syvyyteen, kun eron on oletettu olevan 5000 Kh (ks. kappale 4.9). Laskelmien perusteella lisäys roudan syvyydessä Tampereen seudulla on noin 10 % sekä eristetyssä että eristämättömässä rakenteessa, kun kerran 50 vuodessa toistuvaan ilman pakkasmäärään lisätään 5000 Kh. Näin ollen voidaan todeta, että jos mitoituksessa käytetään kerran 50 vuodessa toistuvaa *ilman* pakkassummaa, se vastaa teoriassa Beskowin menetelmällä laskettaessa kerran 20 vuodessa toistuvaa pakkassummaa *maan pinnassa* ja Skaven-Haugin menetelmällä laskettaessa eristepaksuudesta riippuen kerran 7 – 15 vuodessa toistuvaa pakkassummaa *maan pinnassa*. Toisin sanoen käyttäessä mitoituksessa kerran 50 vuodessa toistuvaa *ilman* pakkassummaa mitoittavan talven tilastollinen toistumistiheys onkin em. 7 – 20 vuotta, kun oletetaan maan pinnassa vaikuttava pakkasmäärä 5000 Kh suuremmaksi kuin ilman pakkasmäärä

5.4 Uuden routasuojauksen mitoitusohjeen laadinta

5.4.1 Mitoitusohjeen laadinnan lähtökohdat

Aiemmissa kappaleissa Skaven-Haugin ja Beskowin laskentamenetelmistä esitettyjen arvioiden nojalla uuden mitoitusohjeen laadinnassa päädyttiin käyttämään Beskowin menetelmäksi kutsuttua laskentamenetelmää (oik. yhdistetty Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin sekä Beskowin menetelmä, ks. kappale 3.1.6).

Mitoitusohjeen laadinnassa käytettyjen parametrien arvot ja määrittämismenetelmät on kootusti esitetty taulukossa 5.5. Routalevyn nimellispaksuudesta vähennettiin mitoitusohjeen laadinnassa 10 mm, joka kuvastaa levyn suojaamattomaan yläpintaan kohdistuvien rasitusten vaikutusta. Tukikerroksen paksuuden oletettiin olevan 55 cm. Materiaaliparametrien osalta käytettiin jo aiemmin taulukossa 5.1 esitettyjä oletusarvoja, joihin siis ei sisälly varmuutta. ”Varmuus” mitoitukseen muodostuu mitoittavan pakkasmäärän tilastollisen toistumistiheyden valinnan myötä. Mitoittajan on tapauskohtaisesti valittava mitoittavan pakkasmäärän toistumistiheys rataosan alusrakenne- luokan perusteella RAMOn osassa 3: ”Radan rakenne” annettujen määräysten mukaisesti.

Koska taulukossa 5.5 esitetyistä parametreista routarajan alla vaikuttavan lämpötilagradientin vaikutus todettiin herkkyytstarkasteluissa varsin huomattavaksi, ja koska lämpötilagradientin oletetaan riippuvan vuotuisesta ilman keskilämpötilasta kaavan 4-13 mukaisesti, uudessa mitoitusohjeessa on mitoittavan pakkasmäärän lisäksi otettu vuotuinen ilman keskilämpötila mitoitustuloksen määrääväksi tekijäksi. Tämä mahdollistaa myös eri alusrakenneluokilla ja siten vaihtelevilla mitoittavan pakkasmäärän toistumisjaksoilla tehtävän routamitoituksen. Esimerkiksi, jos Oulun seudulla rakenne halutaan mitoittaa kerran 10 vuodessa toistuvalla pakkasmäärällä ja Tampereen seudulla kerran 50 vuodessa toistuvalla pakkasmäärällä, päädytään mitoituksessa Tampereen seudulla korkeammasta keskilämpötilasta (ja siten korkeammasta maan lämpötilagradientista) johtuen jonkin verran pienempään rakennepaksuuteen, vaikka mitoittavat pakkasmäärät ovat likimäärin samat.

Pakkaskauden keston suhteellisen vähäinen vaikutus roudan syvyyteen (vrt. kappale 5.3.6) on mitoitusohjetta laadittaessa pyritty ohjaamaan siten, että mitoitusulos asettuu sen suhteen varmalle puolelle. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että käytettäessä mitoitusohjetta kerran 50 vuodessa toistuvalla pakkasmäärällä tehtävään mitoittamiseen pakkaskauden keston määrittämistapa ei aiheuta menetelmävirhettä mitoittettavaan roudan syvyyteen ja taajemmin toistuvilla pakkasmäärillä pakkaskauden kestosta tehdyt olettamukset aiheuttavat hyvin lievää ylimitoitusta.

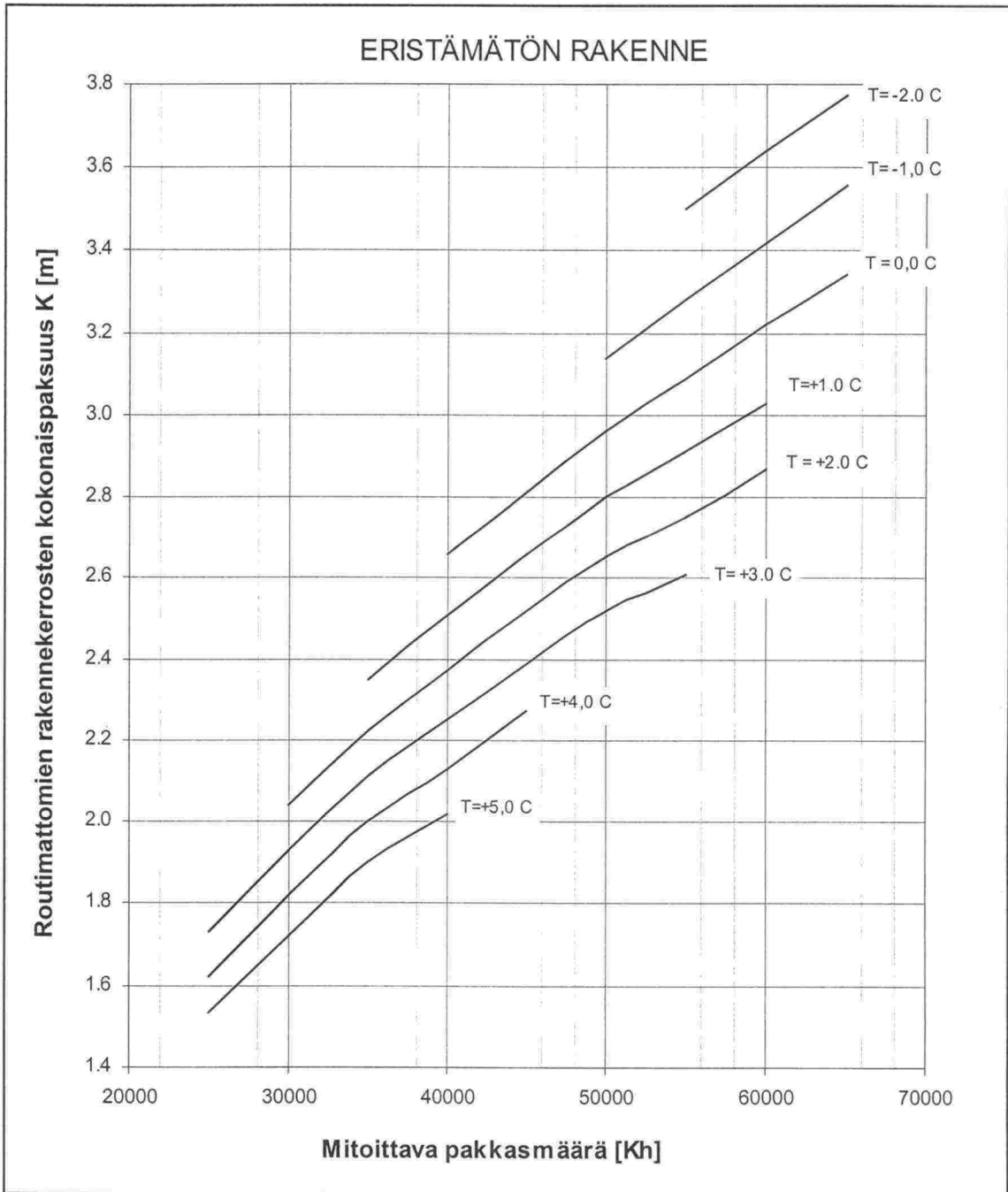
Taulukko 5.5. Uuden mitoitusohjeen laadinnassa käytettyjen parametrien arvot ja määrittämistavat.

| Parametri | Symboli | Arvo | Määrittäminen |
|---|----------------|------------------------|---|
| Routalevypaksuus | d_2 | * | Mitoitettavia arvoja |
| Alusrakennepaksuus | d_3 | * | |
| Tukikerrospaksuus | d_1 | 0,55 m | Kirjallisuusselvityksen (ks. kappale 4) perusteella arvioituja oletusarvoja |
| Vesipitoisuus tukikerroksessa | w_1 | 2 % | |
| Routalevyn vesipitoisuus | w_2 | 10 til. % | |
| Vesipitoisuus alusrakenteessa | w_3 | 6 % | |
| Kuivatiheys tukikerroksessa | ρ_{d1} | 1600 kg/m ³ | |
| Routalevyn kuivatiheys | ρ_{d2} | 40 kg/m ³ | |
| Kuivatiheys alusrakenteessa | ρ_{d3} | 1850 kg/m ³ | |
| Tukikerroksen lämmönjohtavuus | λ_{f1} | 1,1 W/Km | |
| XPS-routalevyn lämmönjohtavuus | λ_{f2} | 0,050 W/Km | |
| Alusrakenteen lämmönjohtavuus | λ_{f3} | 1,7 W/Km | |
| Lämmönjohtavuus routarajan alla | λ_u | 1,5 W/Km | |
| Kerros | S | 0,7 | |
| Sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti | C_u | | Lasketaan kaavalla 4-3 |
| Jäätynneen maan tilavuuslämpökapasiteetti | C_f | | Lasketaan kaavalla 4-4 |
| Lämpötilagradientti routarajan alla | G_+ | | Lasketaan kaavalla 4-13 |
| Pakkasaika | t | | Määritetään kuvasta 4.13b |
| Pakkaskauden keskilämpötila | T_f | | $T_f = F / t$ |

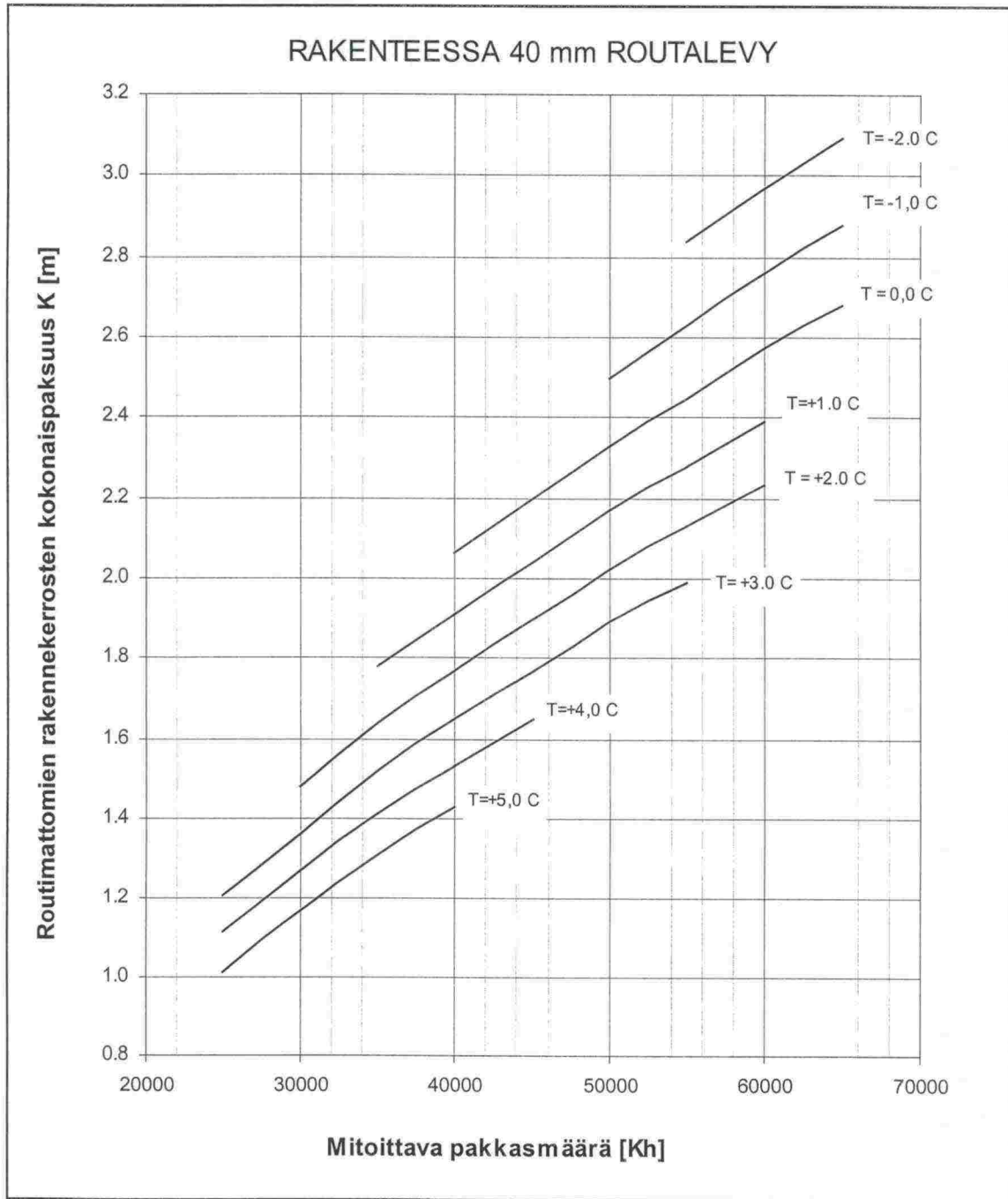
5.4.2 Ratarakenteen uusi routamitoitusohje

Kuvassa 5.12 on esitetty radan routimattomilta rakennekerroksilta vaaditun kokonaispaksuuden määrittäminen mitoittavan pakkasmäärän ja ilman vuotuisen keskilämpötilan perusteella *eristämättömässä* rakenteessa. Vastaavat mitoitusohjeet *eristetyssä* rakenteessa on esitetty *eri eristepaksuuksille* kuvissa 5.13–5.17. Mitoittamalla alusrakenteen tai routalevyn paksuus kuvien 5.12–5.17 perusteella ratarakenteen routimisen todennäköisyys vastaa mitoittavan pakkasmäärän todennäköisyyttä, kun muiden laskentaan vaikuttavien parametrien oletetaan vastaavan taulukossa 5.5 esitettyjä arvoja. Eristetyn rakenteen mitoitusohjekäyrästä (kuvat 5.13–5.17) käytettäessä on muistettava, että käyrästäisiin sisältyy 10 mm vähennys routalevyn nimellispaksuudesta, jota on vaadittu kompensoimaan routalevyyn kohdistuvien rasitusten aiheuttamia mekaanisia vaurioita.

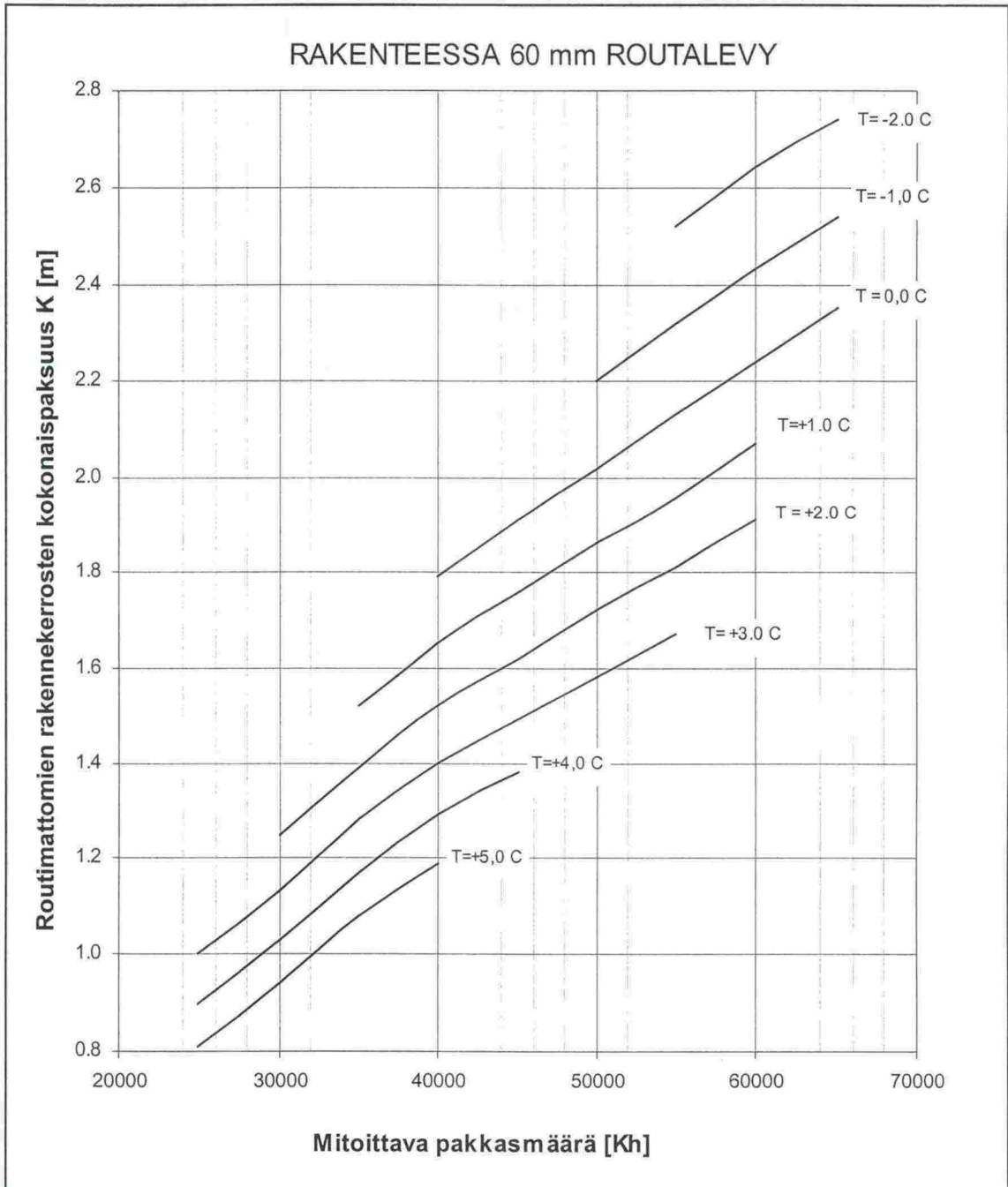
Lisäksi on huomattava, että routalevyn alla olevan routimattoman alusrakennekerroksen minimipaksuusvaatimus on 300 mm käytettäessä luonnonkiviainesta ja 450 mm käytettäessä murskattua kiviainesta (Ratahallintokeskus 1999a).



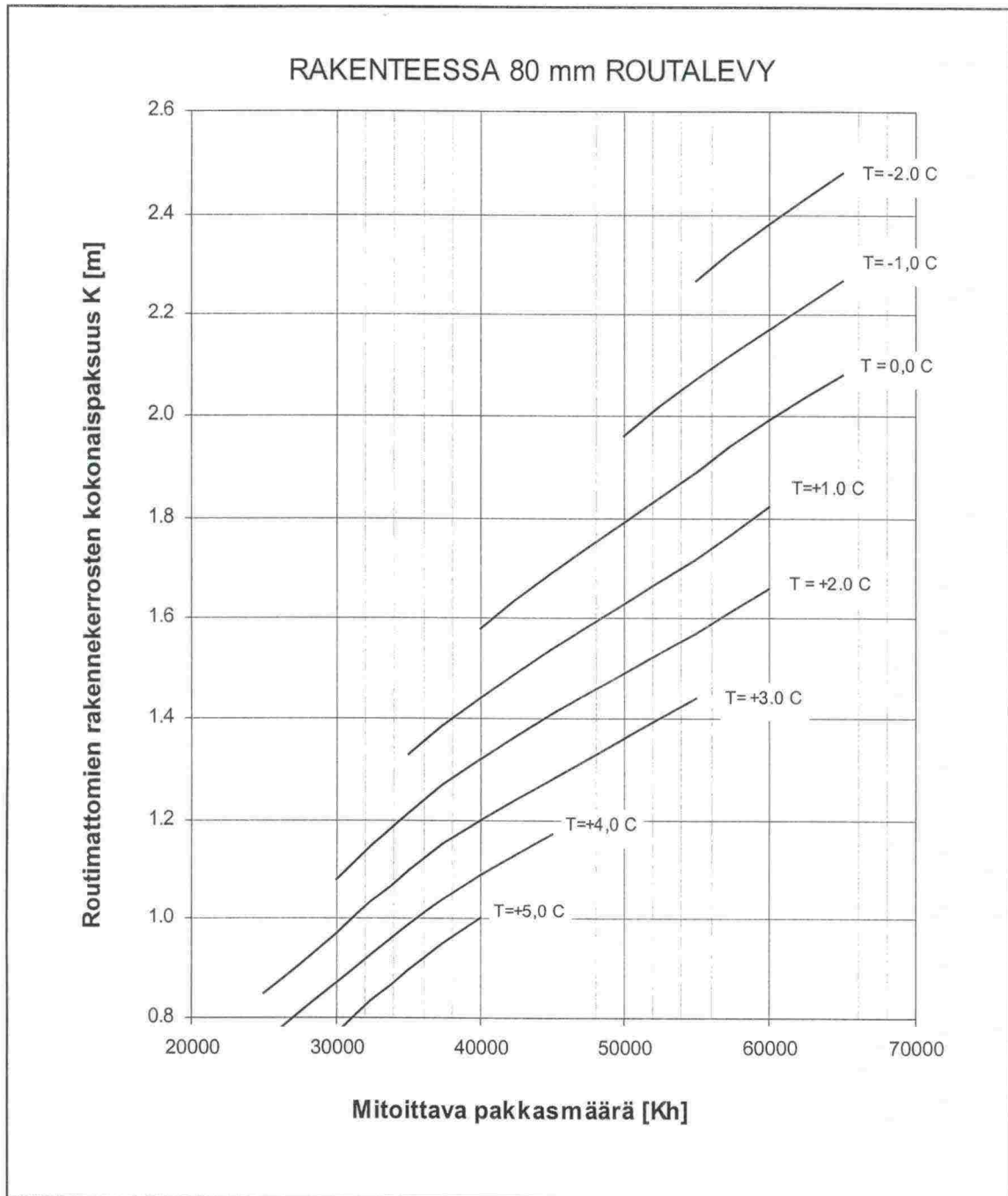
Kuva 5.12. Routamitoitus routaeristämättömässä rakenteessa vuotuisen ilman keskilämpötilan (T) ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella.



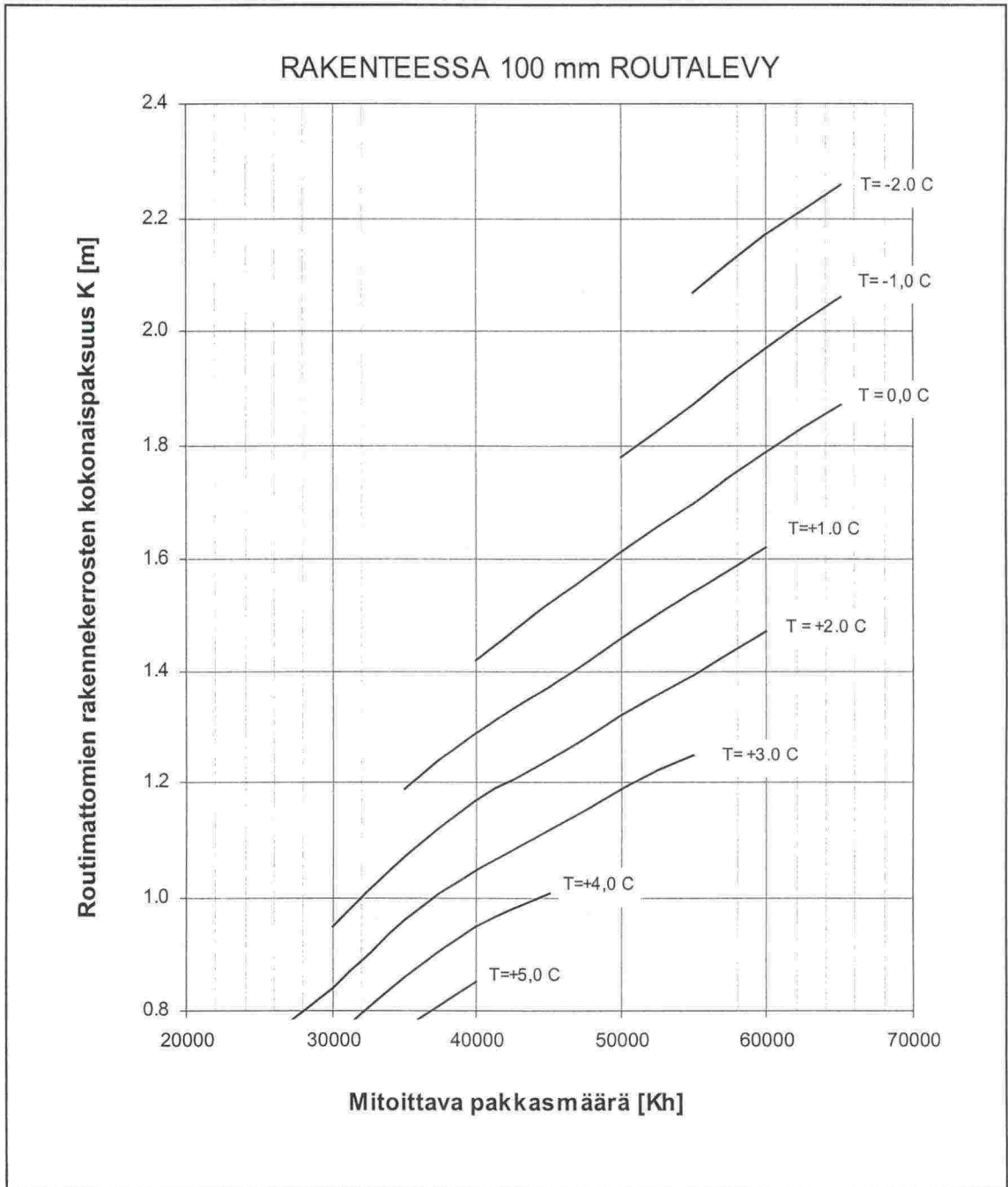
Kuva 5.13. Routamitoitus 40 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa vuotuisen ilman keskilämpötilan (T) ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella.



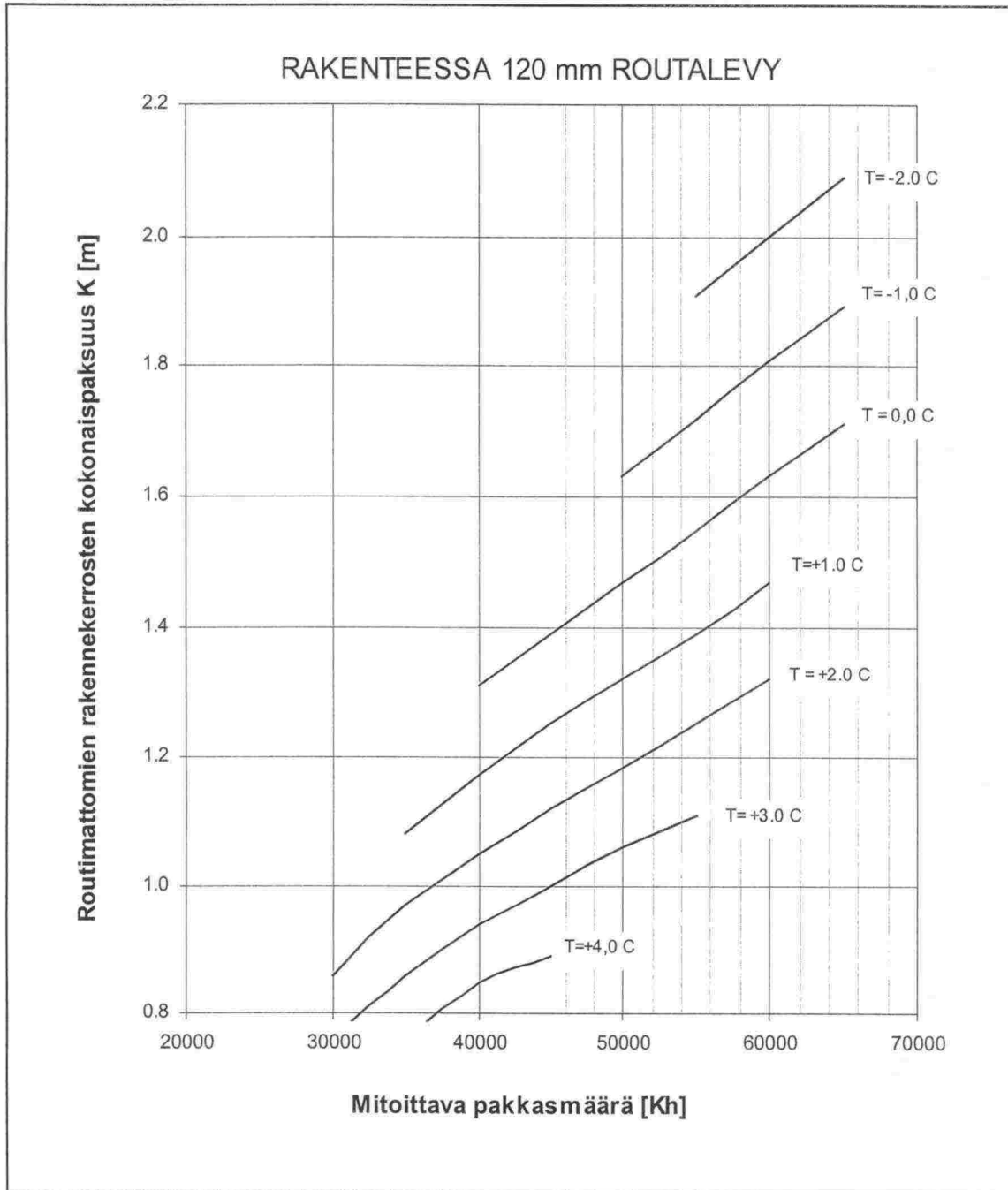
Kuva 5.14. Routamitoitus 60 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa vuotuisen ilman keskilämpötilan (T) ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella.



Kuva 5.15. Routamitoitus 80 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa vuotuisen ilman keskilämpötilan (T) ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella.



Kuva 5.16. Routamitoitus 100 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa vuotuisen ilman keskilämpötilan (T) ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella.



Kuva 5.17. Routamitoitus 120 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa vuotuisen ilman keskilämpötilan (T) ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella.

5.4.3 Esimerkki routamitoituksesta

Seuraavassa tarkastellaan esimerkinomaisesti tavanomaista routamitoitustilannetta Seinäjoen seudulla. Kohde kuuluu alusrakenneluokkaan 2, joten RAMO 3:n mukaan mitoittavana pakkasmääränä käytetään kerran 50 vuodessa toistuvaa ilman pakkas-

määrää. Kuvasta 4.10d luetaan mitoittavaksi pakkasmääräksi siten 47000 Kh. Kuvasta 4.13a nähdään Seinäjoen vuotuiseksi ilman keskilämpötilaksi +3 °C. Näillä lähtötiedoilla on kuvista 5.12–5.17 määritettävissä routimattomalta rakenteelta vaadittu kokonaispaksuus (K) eri eristepaksuuksilla. Tulokset on koottu taulukkoon 5.6.

Taulukko 5.6. Seinäjoen seudulla sijaitsevan esimerkkikohteen routamitoituksen tulokset. Kohde kuuluu alusrakenneluokkaan 2.

| Routalevyypaksuus [mm] | Routimattoman rakenteen kokonaispaksuus (K) vähintään [m] |
|-------------------------|---|
| 0 (eristämätön rakenne) | 2,45 |
| 40 | 1,82 |
| 60 | 1,52 |
| 80 | 1,33 |
| 100 | 1,15 |
| 120 | 1,03 |

Taulukon 5.6 tuloksista on valittavissa routalevyille ja/tai alusrakeelle sopivin paksuus. Jos esimerkiksi kohde on perusparannuskohde, jossa olemassa olevan routimattoman alusrakenteen paksuus on vaikkapa 1,0 metriä ja suunniteltu tukikerrospaksuus 0,55 metriä, kohteeseen tulee perusparannuksen yhteydessä asentaa 60 mm routalevy, jolloin routimattoman rakenteen kokonaispaksuus (K) on 1,61 metriä. Taulukon 5.6 perusteella routimattoman rakenteen kokonaispaksuusvaatimus 60 mm routalevyä käytettäessä on 1,52 metriä. Vastaavasti, jos olemassa oleva alusrakennepaksuus on 0,60 metriä ja suunniteltu tukikerrospaksuus 0,55 metriä, asennettavan routalevyn paksuus tulee olla 100 mm, jolloin routimattoman rakenteen kokonaispaksuus on 1,25 metriä.

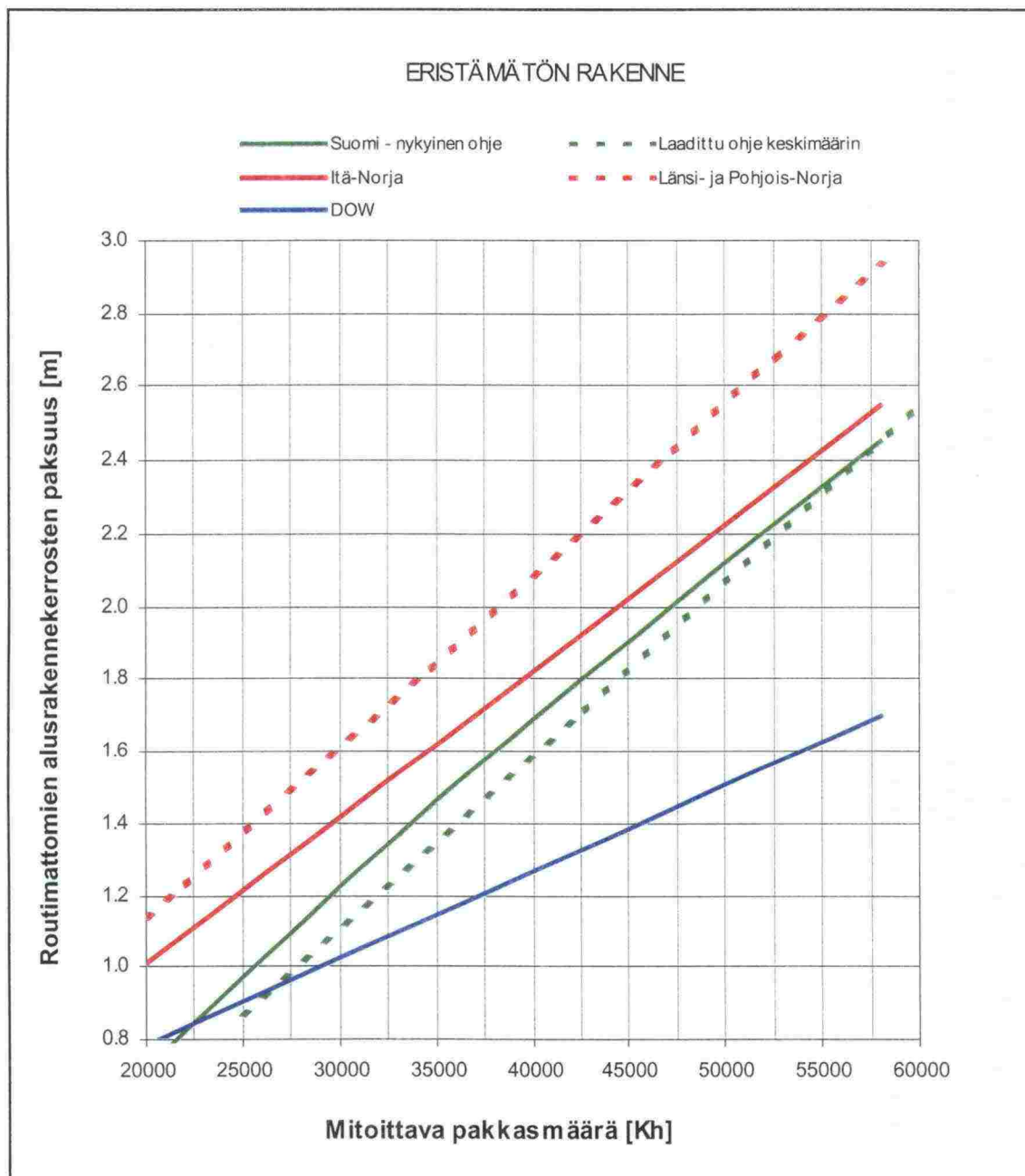
5.4.4 Uuden mitoituskäyrästön vertailu muihin ratarakenteen routamitoituskäyrästäihin

Kuvissa 5.18 ja 5.19 on vertailtu laadittuja routamitoituskäyrästäjä (ks. kappale 5.4.2) aiemmin kappaleessa 3.3 esitettyihin ratarakenteen routamitoituskäyrästäihin. Vertailtavina ovat Suomen ja Norjan rautateillä käytetyt mitoituskäyrästöt sekä routalevyvalmistaja DOW'n esittämä mitoituskäyrästö. Kuviin on lisäksi hahmoteltu laaditusta mitoitusohjeesta saatava likimääräinen mitoitusasuora, joka on piirretty keskimääräisenä arvona joidenkin paikkakuntien vuotuisten keskilämpötilojen ja paikkakunnilla kerran 50 vuodessa toistuvien pakkassummien perusteella.

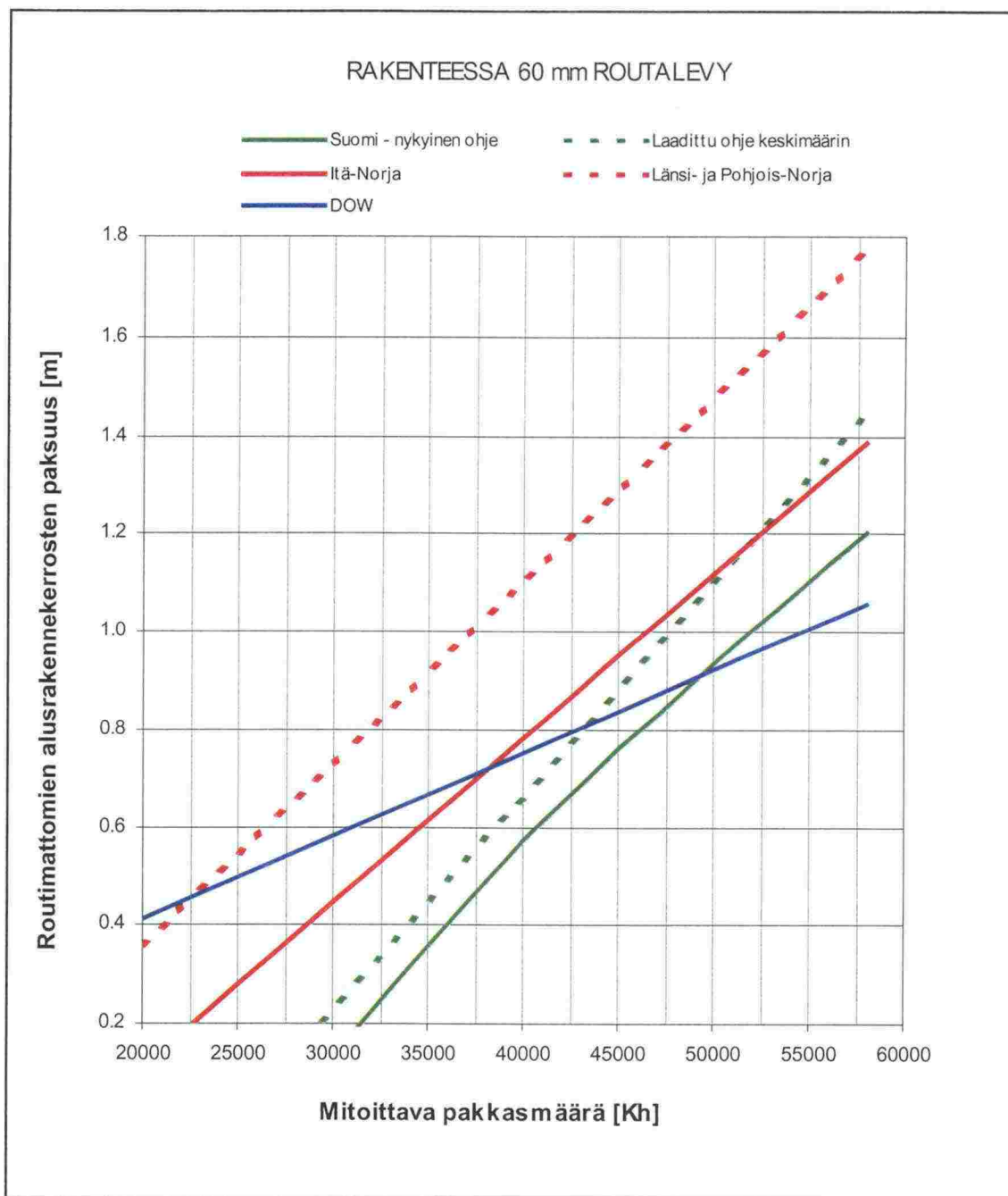
Kuvasta 5.18 nähdään, että DOW'n esittämä mitoituskäyrä poikkeaa muista selvästi alhaisemmalla rakennepaksuusvaatimuksellaan. Norjan käyrästä Itä-Norjan sääolot (vuotuinen keskilämpötila, vrt. kappale 3.3) ovat lähempänä Suomen sääoloja, joskin Suomen kesät ovat Itä-Norjaankin nähden lämpimämpiä. Tämä selittää Suomen käyrillä saatavia hieman norjalaisia käyrästäjä alhaisempia rakennepaksuusvaatimuksia. Laaditulla mitoituskäyrällä päädytään käytössä olevaan käyrään nähden 0-10 cm alhaisempiin rakennepaksuuksiin, joskin on syytä muistaa kuvassa 5.18 esitetyn käyrän likimääräisyys keskilämpötilan määrittämisestä johtuen.

Kuvasta 5.19 nähdään, että DOW'n esittämä käyrä poikkeaa suuresti muista myös eristetyssä rakenteessa. Suomessa aiemmin käytössä olleeseen mitoituskäyrään nähden nyt laaditulla likimääräistetyllä käyrällä saadaan 10-20 cm suurempi rakennepaksuusvaatimus, mikä selittyy routalevyn mitoituslämmönjohtavuuserosta.

Vertailun tuloksena esitetyt eroavaisuuksien perustelut huomioden voidaan todeta, että laadittu mitoitusohje on varsin hyvin linjassa esitettyihin muihin mitoituskäyrästäihin routalevyvalmistaja DOW'n käyrästäjä lukuunottamatta.



Kuva 5.18. Laaditun mitoitusohjeen vertailu muihin ratarakenteen routamitoituksesta esitettyihin mitoituskäyrästäihin eristämättömässä rakenteessa. Osaa käyristä on ekstrapoloitu koskemaan esitettyjä suurempia pakkasmääriä. Likimääräistys tämän selvityksen yhteydessä laaditusta mitoituskäyrästästä on kuvattu vihreällä katkoviivalla. Likimääräistetty suora on piirretty vuotuinen keskilämpötila huomioden siten, että se pätee eri paikkakunnilla keskimäärin kun mitoittavana pakkasmääränä käytetään kerran 50 toistuvaa pakkassummaa.



Kuva 5.19. Laaditun mitoitusohjeen vertailu muihin ratarakenteen routamitoituksesta esitettyihin mitoituskäyrästöihin 60 mm routalevyllä eristetyssä rakenteessa. Osa käyristä on ekstrapoloitu koskemaan esitettyjä suurempia pakkasmääriä. Likimääräistys tämän selvityksen yhteydessä laaditusta mitoituskäyrästä on kuvattu vihreällä katkoviivalla. Likimääräistetty suora on piirretty vuotuinen keskilämpötila huomioiden siten, että se pätee eri paikkakunnilla keskimäärin kun mitoittavana pakkasmääränä käytetään kerran 50 toistuvaa pakkassummaa.

6. YHTEENVETO

Ratarakenteen routasuojauksen suunnittelun tavoitteeksi voidaan lausua routanoususta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden suuruuden ja toistuvuuden hallinta. Epätasaisuuden *suuruuden* hallinnalla tarkoitetaan raiteen suuren tasaisuusvaatimuksen vuoksi käytännössä rakenteen mitoittamista sellaiseksi, että roudan tunkeutuminen routivaan maahan on mitoitus- ja laskentatalvena kokonaan estetty. Tällöin routamitoituksessa käytetään roudan syvyyden laskentaan perustuvia menetelmiä. Epätasaisuuden *toistuvuuden* hallinnalla ymmärretään mitoittavan talven ankaruuden valitsemista sellaiseksi, että mitoitus- ja laskentatalven toistumisen tilastollinen todennäköisyys vastaa todennäköisyyttä, jolla routimista sallitaan tapahtuvaksi.

Lämmön siirtyminen maaperässä on lämpötilaerojen tasoittumispyrkimyksen johdosta tapahtuvaa energian siirtymistä. Pääosa lämmön siirtymisestä maaperässä tapahtuu Fourierin lain mukaisesti johtamalla, jonka lisäksi tietyillä rakeisuusalueilla konvektiivinen ja säteilynä tapahtuva lämmönsiirtyminen ovat mahdollisia. Koska kokemukset kalliomurskeen käytöstä alusrakenteissa ovat vähäisiä, tulisi varmistua siitä, että murskatuille alusrakennemateriaaleille asetetut rakeisuusvaatimukset ovat riittävät estämään konvektion.

Maan jäätymisprosessin tarkastelu perustuu energian häviämättömyyden lakiin, jonka nojalla valitulta tasealueelta poistuva energiamäärä vastaa alueen sisälle tulevan ja alueella vapautuvan energiamäärän summaa. Tarkasteltaessa tasealueena differentiaalisena ohutta kerrosta routarajalla tasealueelle virtaava lämpö voidaan jakaa sulan maan jäätyislämmöksi, routivaan maahan imeytyvän veden jäätyislämmöksi ja geotermiseksi lämmöksi. Vastaavasti tasealueella vapautuva lämpö koostuu alueen sisältämän veden olomuodonmuutoslämmöstä ja sekä maaperän jäätyislämmöstä. Ennen kuin roudan tunkeutumistarkasteluja on tarpeen tehdä moniulotteisesti huomioiden myös vaakasuuntainen lämmönsiirtyminen, on syytä pohtia onko rata- ja rakennemielekkästä mitoittaa suurelle pakkasmäärälle ja samaan aikaan lumettomalle talvelle, sillä lumi ratapenkereen luiskissa toimii tehokkaana eristeenä.

Tarkastellut analyyttiset roudan syvyyden laskentamenetelmät pohjautuvat maan jäätymisprosessin tarkasteluun energian häviämättömyyden lain nojalla muodostettujen lämpötaseyhtälöiden avulla. Erona eri menetelmien välillä on lämmönsiirtymisen osakomponenttien huomioimistavat. Alun perin vesistöjen jään paksuuden arviointiin kehitetty Stefanin menetelmä on ensimmäinen roudan syvyyden laskentamenetelmä, jota on sittemmin paranneltu monen eri tekijän toimesta. Ratarakenteen mitoitusohjeen tarkasteluihin parhaimmin nykyisin esitetyistä menetelmistä soveltuvaksi arvioitiin yhdistetyn Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin sekä Beskowin menetelmän nimellä esitetty menetelmä, jota käytettiin myös uuden routamitoitusohjeen laadinnassa. Laskelmissa käytettiin myös ns. Watzingerin – Skaven-Haugin menetelmää, mutta ohjetta laadittaessa siitä luovuttiin sen käyttöön liittyvien epä johdonmukaisuuksien takia.

Roudan tunkeutumis- ja syvyyden laskentaan perustuvien routamitoitusmenetelmien, ja siten myös ratarakenteen routamitoituksen lähtökohtana on, että routaantuvat maat ovat routimattomia. Pohjamaan ollessa routimatonta rakennekerrosten paksuutta voidaan ohentaa ja sallia roudan tunkeutuminen myös pohjamaahan. Rakentamiseen

käytettävissä olevien soravarojen vähentyessä ja siten murskatun kalliokiviaineksen käytön arvatenkin lisääntyessä tulee ennen siirtymistä laajamittaiseen kalliomurskeen käyttöön soraa korvaavana ratarakennemateriaalina kattavin tutkimuksin selvittää murskeelle asetettavat vaatimukset, joilla varmistetaan kalliomurskeen säilyminen routimattomana ratarakenteen toistuvan mekaanisen kuormituksen sekä ympäristö-
rasitusten alaisessa rankassa kuormitusympäristössä.

Kirjallisuusselvityksen perusteella parametreille arvioituihin oletusarvoihin sekä parametrien määrittämismenetelmiin pohjautuen tehdyissä roudansyvyyslaskelmissa maa-
materiaalien lämmönjohtavuuden vaikutus roudan syvyyteen havaittiin melko huomattavaksi. Tästä syystä valittujen oletusarvojen soveltuvuus mitoituksessa käytettäviksi tulisi varsinkin murskattujen materiaalien osalta varmistaa mittauksin myöhemmässä vaiheessa, kun alusrakenteeseen soveltuva murskemateriaali on routimattomuuden säilymisen sille asettamien vaatimusten myötä selvitetty. Esimerkiksi suuruudeltaan $0,1 \text{ W/Km}$ muutos tukikerrosmateriaalin lämmönjohtavuudessa vaikuttaa roudan syvyyteen 3–4 %. Koska lisäys materiaalin vesipitoisuudessa ja kuivatiheydessä lisää sen lämmönjohtavuutta, ja koska näiden lisäysten vaikutus roudan syvyyteen on vastakkainen, on arvojen määrittämisessä oleellista, että mitoituksessa käytetään tiettyä vesipitoisuutta ja kuivatiheyttä vastaavaa lämmönjohtavuusarvoa. XPS-routalevyllä laboratoriossa tehtyjen lämmönjohtavuusmittausten perusteella päädyttiin mitoitus-
lämmönjohtavuutena käyttämään 10 til.% kosteuspitoisuutta vastaavaa lämmön-
johtavuusarvoa, eli $0,050 \text{ W/Km}$.

Verrattaessa *eristetyssä* rakenteessa laskettuja roudan syvyyksiä voimassa olevasta mitoitusohjeesta saataviin arvoihin lasketut roudan syvyydet todettiin näiltä osin pääsääntöisesti ohjeen arvoja suuremmiksi. Erot johtuvat suurelta osin XPS-routalevyn mitoituslämmönjohtavuudesta, jona ohjetta laadittaessa on käytetty arvoa $0,037 \text{ W/Km}$, joten varsinaista alimitoitusta ei voida sanoa pitkällä aikavälillä tehdyn, sillä mitoitus-
lämmönjohtavuuden korottaminen johtuu pääasiassa levyn valmistusmenetelmässä muutamia vuosia sitten tapahtuneen muutoksen myötä kasvaneesta uuden levyn lämmönjohtavuudesta. *Eristämättömän* rakenteen osalta nykyisessä mitoitusohjeessa ei laskelmien mukaan ole alimitoitusta.

Laskelmissa todettiin kyseeseen tulevan vaihteluvälin puitteissa parametreista sulan maan lämpötilagradientilla olevan suurin vaikutus Beskowin menetelmällä laskettuun roudan syvyyteen. Lämpötilagradientin on todettu olevan suoraan verrannollinen vuotuiseen ilman keskilämpötilaan, minkä johdosta keskilämpötila otettiin lämpötila-
gradientin sijaan uuteen routamitoitusohjeeseen tapauskohtaisesti valittavaksi parametriksi.

Uudessa routamitoitusohjeessa routimisesta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden toistuvuutta hallitaan mitoittavan pakkasmäärän tilastollisen toistumistiheyden valinnalla. Tampereen esimerkkikohteelle tehtyjen laskelmien perusteella ero roudan syvyydessä kerran 10 ja kerran 50 vuodessa toistuvalla pakkasmäärällä on Beskowin menetelmällä laskettuna eristämättömässä rakenteessa 34 cm ja eristetyssä rakenteessa 20–30 cm. Taajemmin kuin kerran kymmenessä vuodessa toistuvilla pakkasmäärillä toistumistiheyden vaikutus roudan syvyyteen luonnollisesti korostuu huomattavasti.

Ilman ja maanpinnan lämpötilaerosta johtuen Norjassa käytetään routamitoituksessa mitoitettavan aikavälin ilman pakkassummaa lisättynä 5000 Kh. Tämän perusteella, jos mitoituksessa käytetään kerran 50 vuodessa toistuvaa *ilman* pakkassummaa, se vastaa teoriassa Beskowin menetelmällä laskettaessa kerran 20 vuodessa toistuvaa pakkassummaa *maan pinnassa*.

LÄHDELUETTELO

Aittomäki, A. (1986). Maan jäätyminen ja sulamisen termofysiikka. RIL K66-1986 Routa maa- ja pohjarakentamisessa. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. ss. 5-22.

Andersland, O. B. & Anderson, D. M. (1978). Geotechnical engineering for cold regions. New York. 551 s

Beskow, G. (1935). Tjälbildningen och tjällyftningen med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. Statens Väginstitut, Meddelande nr. 48, Stockholm. 242 s.

Beskow, G. (1947). Scandinavian soil frost research of the past decade. Proceedings of the twenty-seventh annual meeting of the Highway research board. Washington D. C.

Chamberlain, E., Gaskin P. (1984). Survey of methods for classifying frost susceptibility. in Frost action and its control. Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph. American Society of Civil Engineers. New York. ss. 105-142.

Dow Suomi Oy (2000). Styrofoam Ratkaisut; Maarakenteiden routasuojaus. Syyskuu 2000. 27 s.

Ehrola, E. (1974a). Maan routaantuminen ja sen matemaattinen käsittely. Oulun Yliopisto, Tie- ja maarakennustekniikan laitos. Julkaisu 21. 43 s., 8 liitettä.

Ehrola, E. (1974b). Tierakenteen lämpötiloista. Oulun Yliopisto, Tie- ja maarakennustekniikan laitos. Julkaisu 22. 20 s., 8 liitettä.

Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki. ISBN 951-682-338-6. 365 s.

Fischer, K. (1991). Routateknisen suunnittelun sisältö tiehankkeessa. RIL K133-1991 Routatekniikka liikennealueilla. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. ss. 37-54.

Flygare, P et al. (1989). Maakosketuksessa olevat lämmöneristeet. VTT Tiedotteita 1061. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo. 105 s.

Friberg, P., Slunga, E. (1989). Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohjarakennus ja maamekaniikka. Otaniemi. 130 s.

Heiersted, R., S. (1976). Klimadata til frostsikring. Frost i jord nr. 17. Sikring mot teleskader. Kapittel III. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg for Frost i jord. Oslo. ss. 35-70.

Helander, R. (1986). Maapohjan lämpötekniiset mitoituslaskelmat. RIL K66-1986 Routa maa- ja pohjarakentamisessa. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. ss. 23-66

Hentilä, V., Slunga, E., Palolahti, A. (1994). Roudan vaikutusten mallintaminen. Tielaitoksen selvityksiä 8/1994. Helsinki. 81 s., 14 liites.

ISSMFE (1989). Technical Committee on Frost, TC-8, Work report 1985-1989. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering. Volume 1. International symposium 13-15.3.1989, Saariselkä, Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. ss. 15-70.

Jernbaneverket (1999). Laerebok i jernbaneteknikk. L521 Kapittel 6, Frost. Utgitt 15.09.1999. 39 s.

Jessberger, H. L., Jagow, R. (1989). Determination of frost susceptibility of soils. VTT Symposium 95. Frost in geotechnical engineering. International symposium 13-15-3-1989, Saariselkä, Finland. Espoo Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Vol 2. Ss. 449-469.

Johansen, Ö. (1975). Thermal conductivity of soil and rock. Frost i jord nr. 16, October 1975. Oslo. ss. 13-22.

Johansen, Ö., Frivik, P.-E. (1976). Grunnlag for termisk dimensjonering. Frost i jord nr. 17. Sikring mot teleskader. Kapittel II. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg for Frost i jord. Oslo. ss. 24-34.

Johansen, Ö., Frivik, P.-E., Pedersen, K., B., Bjerkan, O. (1976). Varmetekniske egenskaper av jord og bygningsmaterialer. Frost i jord nr. 17. Sikring mot teleskader. Kapittel IV. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg for Frost i jord. Oslo. ss. 71-121.

Johansen, Ö. (1982). Termisk dimensjonering av jernbanefundamenter. Frostsikring med isolasjon. Frost i jord nr. 24, Juni 1982. Oslo. ss. 27-38.

Jonsson, B. (1993). Tjälisolering i vägar, Varmer- och fuktteknisk funktion. Laboratieprovingar, provuttag från vägar. SP Rapport 1993:06. Borås, Swedish National Testing and Research Institute. 27 s., 24 liites.

Kauppi, S. (2000). Routalaskelmat tien parantamishankkeissa. Diplomityö. Oulun Yliopisto, Geotekniikan laboratorio. 111 s., 12 liitettä.

Kolisoja, P. (1993). Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993. Helsinki. 71 s.

Kolisoja, P. (1996). Sitomattomien materiaalien moduulit; Vuoden 1995 kokeet. Tien pohja- ja päällysrakenteet- tutkimusohjelma, Loppuraportti, Projekti M12. Tielaitoksen selvityksiä 34/1996. Helsinki. 49 s., 3 liitettä.

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. Väitöskirja. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, julkaisuja 223. 188 s., 13 liites.

Konrad, J-M (1980). Frost heave mechanics. Ph.D. Thesis. University of Alberta. Edmonton. 405 s., 67 liites.

Kujala, K. (1994). Routanousun mallintaminen, kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. Oulu. 135 s.

Lattu, P., Welin, O. (1979). Eristeet; solumuovit; polystyreeni. RIL 117 Lämmön- ja kosteudeneristys, luku 4.221. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki. ss. 162-167.

Myyrä, V. (1983). Solumuovin käyttö radan eristämiseen. Rakennustekniikka nro. 6/1983.

Mäkelä, H. & Petäjä, J. & Kivikoski, H. (1986). RIL 166 Pohjarakenteet, Luku 14. Routasuojaus ja maan lämpökapasiteetti. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, Helsinki. ss. 381-406.

Nixon, J. (1982). Field frost heave predictions using the segregation potential concept. Canadian Geotechnical Journal 19. ss. 526-529.

Nordal, R. S., Refsdal, G. (1989). Frost protection in design and construction. VTT Symposium 94. Frost in geotechnical engineering. Volume 1. International symposium 13-15.3.1989, Saariselkä, Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. ss. 127-164.

Nurmikolu, A. (2000). Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus Tekninen yksikkö. 93 s., 34 liites.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. (2001a). XPS-Routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2001. Helsinki, Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. 97 s., 3 liitettä.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. (2001b). Routalevyjen kunnon esiselvitys rataosuudella Kannus – Oulu. TTKK Geotekniikan laboratorio. Julkaisematon. 10 s.

Phukan, A. P. E. (1989). Preventing measures against frost actions in soils. VTT Symposium 95. Frost in geotechnical engineering. Volume 2. International symposium 13-15.3.1989, Saariselkä, Finland. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo. ss. 749-769.

Ratahallintokeskus (1999a). Rautateiden maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL). Osa 5 Maaleikkaus- ja pengerrystyöt. Helsinki, Ratahallintokeskus. 65 s.

Ratahallintokeskus (1999b). Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 99 s., 47 liites.

Refsdal, G. (1987). Frost protection of road pavements with insulating boards. Norwegian practice and experience. Frost i jord nr. 26, Frost action in soils. Oslo. ss. 3-10.

RIL (1992). Routavauriot ja routasuojaus. Suunnitteluohjeita ja esimerkkejä. RIL 193-1992. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 89 s.

Saarelainen, S. (1990). RIL 157-2 Geomekaniikka II, Luku 18.2 Maan lämpötekniset ominaisuudet, Luku 18.3 Routaantuminen ja routiminen. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, Helsinki. ss. 273-287.

Saarelainen, S. (1991). Routaantuminen ja routiminen. RIL K133-1991 Routatekniikka liikennealueilla. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. ss. 5-22.

Saarelainen, S. (1992). Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland, The SSR model. VTT Publications 95. Espoo. ISBN 951-38-4073-5. 119 s.

Saarelainen, S. (1993). Arktinen tierakentaminen; Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. Tielaitoksen tutkimuksia 5/1993. Helsinki. ISBN 951-47-6851-5. 63 s.

Saarelainen, S. & Kivikoski, H. (2000). Tierakenteen routamitoitus, TPPT Työraportti 31.1.2000. VTT Yhdyskuntatekniikka. 45 s.

Saetersdal, R. (1976). Jordarters telefarlighet. Frost i jord nr. 17. Sikring mot teleskader. Kapittel V. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg for Frost i jord. Oslo. ss. 123-152.

Sandegren, E. (1977). Cellplast användning för lösande av ingenjörgeologiska problem inom Statens Järnvägar. Frost i jord nr. 18. Oslo. ss. 35-41.

Skaven-Haug, S. (1971). Frostfundamenters dimensjonering frysevarme og jordvarme. Frost i jord nr. 3, Juli 1971. Oslo. ss. 9-27.

SNiP II-18-76. (1985) Perustat ja perustukset ikeroutamaalla. Rakentamisen normit ja ohjeet. RIL. Normikäännös. 96 s.

Soveri, J., Varjo, M. (1977). Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-1975. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 20. Helsinki. 66 s.

Stefan, J. (1890). Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere. Vol. 98. Part II a. Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Wien. ss. 965-983.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet (1997). VTT Yhdyskuntatekniikka ja Rakennustieto Oy, Helsinki. 94 s.

TVL (1985). Teiden suunnittelu. TVL:n ohjeet. Kansio B, osa IV Tien rakenne. Tie- ja vesirakennushallitus.

Watzinger, A., Kindem, E., Michelsen, B. (1965). Masseutskiftingsmaterialer for teleforebygging på vei- og jernbane. Varmetekniske undersøkelser. Norges geotekniske institutt, Oslo.

XPS-ROUTALEVYJEN PITKÄKESTOISET SYKLISET KUORMITUSKOKEET

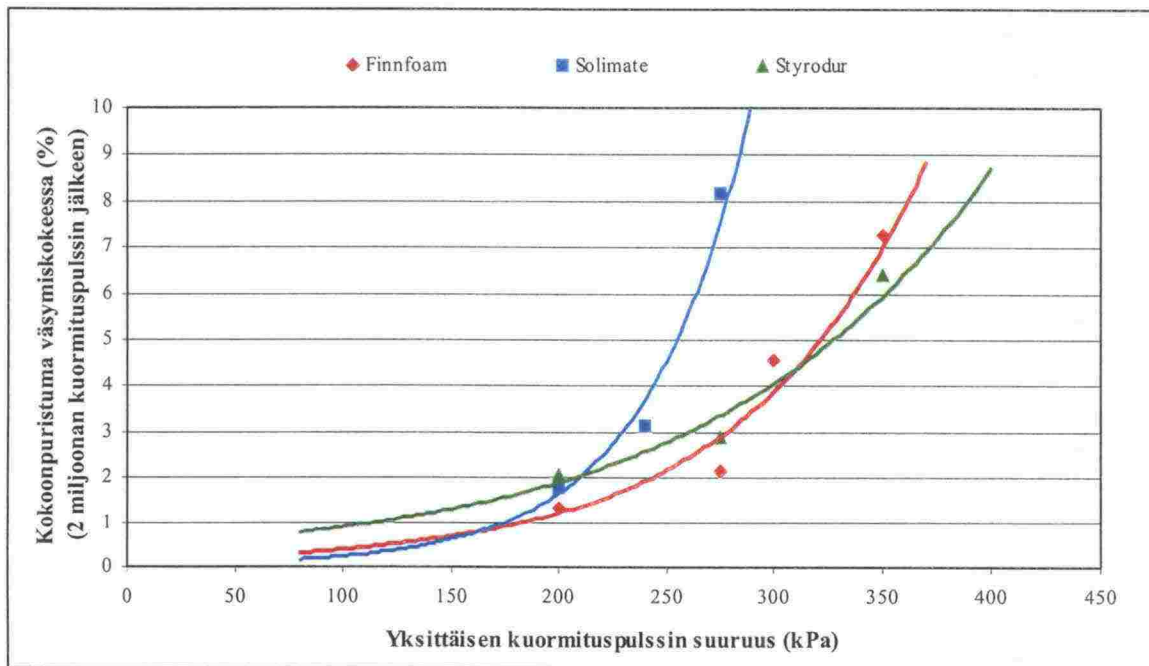
SISÄLTÖ

| | |
|--|----|
| 1. TUTKIMUSTEN TAUSTA JA TAVOITE | 2 |
| 2. TUTKIMUKSISSA KÄYTETYT LEVYT | 4 |
| 3. TIHEYD JA PAKSUUS..... | 4 |
| 4. STAATTISET PURISTUSKOKEET | 6 |
| 5. VÄSYMISKOKEET | 8 |
| 5.1 Koejärjestelyt | 8 |
| 5.2 Mittaushetken kuormituksen vaikutus kokoonpuristumaan..... | 8 |
| 5.3 Ekstrapoloitu vs. täysimittaisen kokeen kokoonpuristuma | 10 |
| 5.4 Akselikuorman korottamisesta routalevyyn aiheutuvan vauriolisäyksen arviointi | 12 |
| 6. YHTEENVETO..... | 13 |
| LÄHTEET | 14 |

1. TUTKIMUSTEN TAUSTA JA TAVOITE

Ratarakenteen routaeristeenä käytettävien suulakepuristettujen XPS-routalevyjen toisto-kuormituskestävyyttä selviteltiin TTKK:n Pohja- ja maarakenteiden laboratoriossa melko laajasti tutkimusprojektissa, jonka tulokset raportoitiin Ratahallintokeskuksen (RHK) julkaisussa ”XPS-Routaeristelevyt ratarakenteessa” (Nurmikolu & Kolisoja 2001). Seuraavassa lyhyesti tuon projektin sisällöstä nyt raportoitavien mittausten taustaksi.

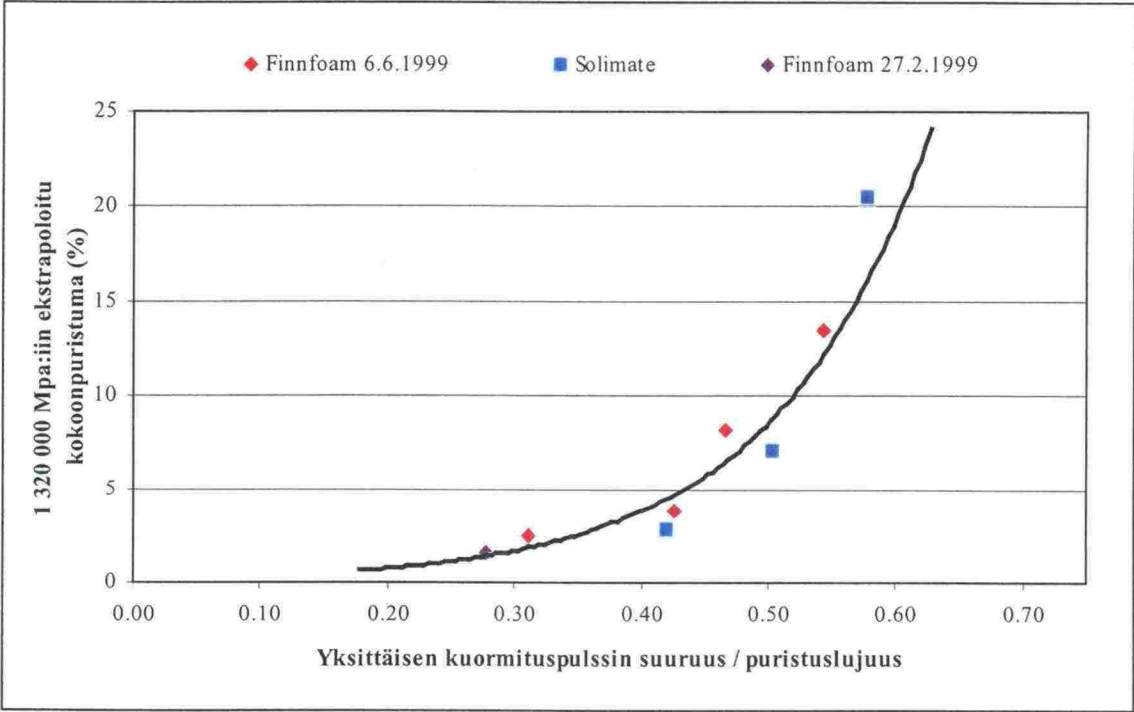
Pääasiallisena tutkimusmenetelmänä oli myös XPS-routalevyn laadunvalvontakokeena käytettävä väsymiskoe, jossa käyttämättömästä routalevystä sahattua näytekappaletta (400 mm x 400 mm) kuormitetaan toistuvasti 4 Hz taajuudella yhteensä 2.000.000 kertaa. Koesarjoissa, joita tehtiin yhteensä 16, varioitiin kuormituspulssin suuruutta pyrkimyksenä akselikuorman mahdollisesta korottamisesta aiheutuvan vauriolisäyksen arvioinnin mahdollistaminen. Levyn vaurioitumista arvioitiin kokeessa muodostuvan kokoonpuristuman perusteella (ks. kuva 1).



Kuva 1. Väsymiskokeessa (2 000 000 kuormituspulssin jälkeen) XPS-routalevynäytteisiin muodostunut kokoonpuristuma yksittäisen kuormituspulssin suuruuden suhteen eri valmistajien levyillä (Nurmikolu & Kolisoja 2001).

Vaurioitumisen mallintamisessa olettamuksena oli, että routalevyyn kohdistuu 250 kN akselikuormasta suuruudeltaan 110 kPa kuormitus. Tarkastelujaksoksi valittiin 300 milj. bruttotonnin kumulatiivista junakuormitusta vastaava kuormitusmäärä, johon vaadittu kuormituspulssien lukumäärä riippuu luonnollisesti yksittäisen pulssin kuormitus-tasosta. Väsymiskokeet tehtiin kaikki kuitenkin 2.000.000 pulssimäärällä, minkä johdosta muodostuvaa kokoonpuristumaa jouduttiin ekstrapoloimaan vastaamaan em. 300 milj. bruttotonnia, joka routalevyyn kohdistuvaksi kuormitukseksi muunnettuna on 1.320.000 MPa.

Kokeissa käytettiin kaikkien kolmen Suomen rautateille XPS-routalevyjä toimittaneiden materiaalivalmistajien levyjä. Koska on selvää, että levyn staattinen puristuslujuus vaikuttaa merkittävästi levyn toistokuormituskestävyyteen, ja koska puristuslujuus levyjen välillä vaihteli, vaurioitumisen arviointitarkasteluun liitettiin lisäksi levyn staattinen puristuslujuus (ks. kuva 2), joka testattiin yhteensä 44 näytekappaleesta.



Kuva 2. Väsymiskokeessa Finnfoam- ja Solimate-levyihin muodostunut kokoonpuristuma ekstrapoloituna 300 milj. bruttotonnin junakuormitusta vastaavaan kuormitukseen (routalevyn tasolla vastaa 1.320.000 MPa kuormitusta) kuvattuna kuormituspulssin suuruuden ja levyn puristuslujuuden osamäärän suhteen (Nurmikolu & Kolisoja 2001).

Tehtyjen kokeiden ja olettamusten perusteella laadittiin taulukon 1 mukainen ennuste RHK:n routalevyille asettaman puristuslujuusvaatimuksen (450 kPa) alarajaa vastaavaan levyyn mahdollisesta akselikuorman korottamisesta aiheutuvasta vaurioitumis-lisäyksestä. Taulukko 1, samoin kuin kuva 2, on laadittu Finnfoam- ja Solimate-levyille tehtyjen kokeiden tuloksista.

Taulukko 1. Akselikuorman korottamisen aiheuttama, puristuslujuudeltaan 450 kPa olevan, XPS-routalevyn vaurioitumisen lisääntyminen (%) kuvan 2 mukaan (Nurmikolu & Kolisoja 2001).

| Akselikuorman korotus | Korotusta vastaava routalevyn vauriolisäys | |
|-----------------------|---|-------|
| | Varmuuskerroin levyn kohdistuvalle kuormitustasolle | |
| | 1,0 | 1,5 |
| 225 kN → 250 kN | 22 % | 35 % |
| 225 kN → 300 kN | 82 % | 146 % |

Seuraavassa raportoitavien lisätutkimusten tavoitteena oli täysikestoisten, 1.320.000 MPa kokonaiskuormitukseen ulotettujen väsymiskoesarjojen perusteella varmistua aiemmin tehtyjen ekstrapolointien oikeellisuudesta tai tarvittaessa tarkentaa virheellisten ekstrapolointien nojalla tehtyjä vaurioitumisennusteita. Lisäksi staattisilla puristuskokeilla pyrittiin arvioimaan puristuslujuuden merkitystä levyn toistokuormituskestävyyteen sekä tarkastelemaan levyn puristuslujuuden kasvua ajan suhteen. Samassa yhteydessä määritettiin koekappaleiden tiheydet sekä keskimääräiset paksuudet.

2. TUTKIMUKSISSA KÄYTETYT LEVYT

Tutkimukset tehtiin käyttämättömille ratarakenteen routaeristeeksi tarkoitetuille Finnfoam- ja Solimate-levyille. Levyt olivat aiemmassa (Nurmikolu & Kolisoja 2001) tutkimuksessa käytettyjen levyjen kanssa samasta tuotantoerästä (samalla minuutilla valmistettuja) levyjä. Taulukossa 2 on esitetty kokeissa käytettyjen levyjen tiedot ja tehtyjen kokeiden määrät.

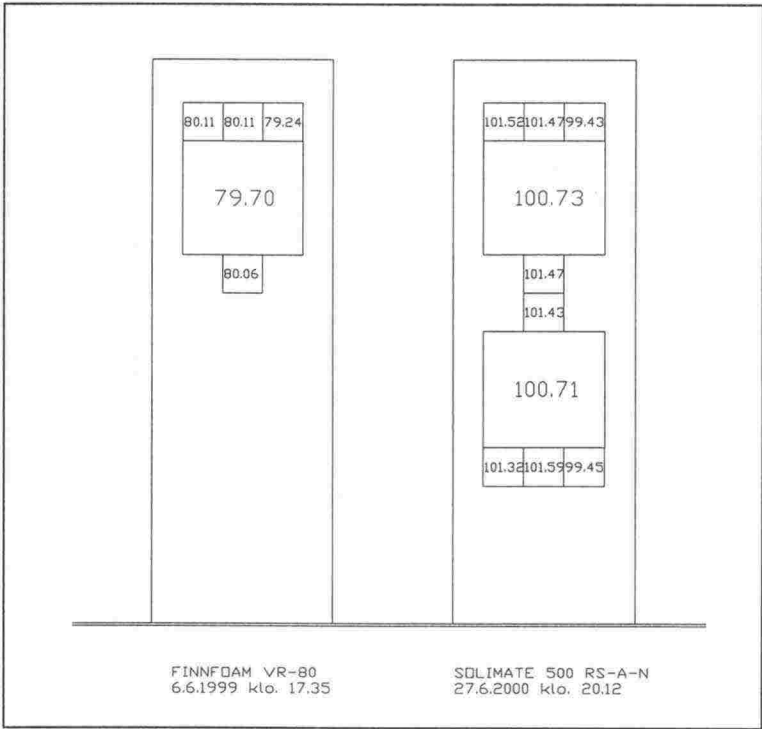
Taulukko 2. Tutkimuksissa käytetyt levyt ja kullekin levytyypille tehtyjen kokeiden lukumäärä.

| Valmistaja | Finnfoam Oy | Dow Sverige AB |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Levyn tyyppi | VR-80 | Solimate 500 RS-A-N |
| Nimellispaksuus | 80 mm | 100 mm |
| Valmistusaika | 6.6.1999 klo 17.35 | 27.6.2000 klo 20.12 |
| Vastaanottopäivä | 10.5.2000 | 28.7.2000 |
| Toimitustapa | Valmistajan lähetykset tehtaalta | Valmistajan lähetykset tehtaalta |
| Puristuskokeita | 4 | 8 |
| Väsymiskokeita (à 1.320.000 MPa) | 1 | 2 |
| Tiheysmäärittämiä | 5 | 10 |
| Paksuusmäärittämiä | 5 | 10 |

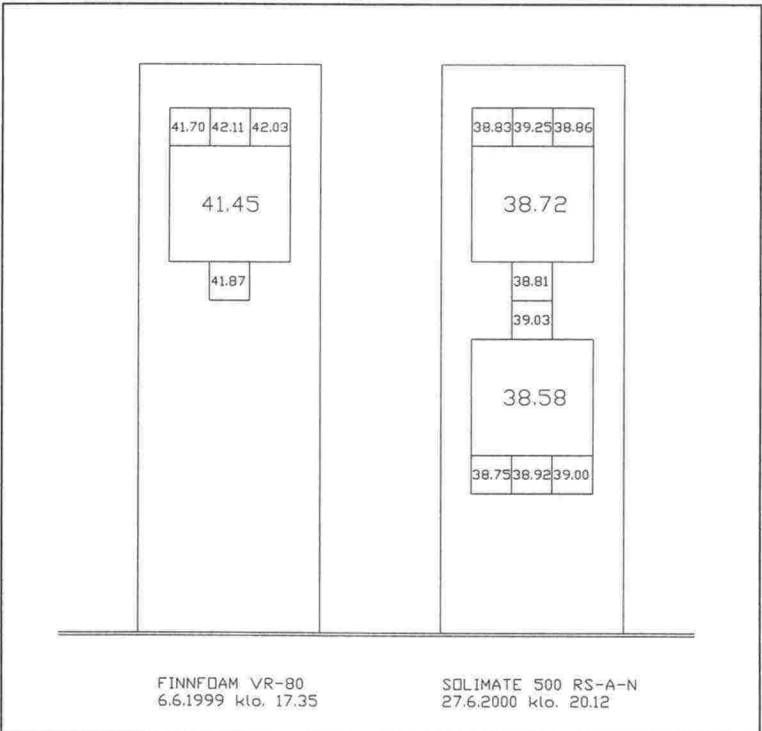
3. TIHEYD JA PAKSUUS

Tiheys ja paksuus mitattiin kustakin puristus- ja väsymiskoelehdeltä ennen koetta. Puristuskoelehdeltä tilavuuden laskennassa käytettiin kunkin sivun ylä- ja alareunasta sekä keskeltä mitattujen sivupituuksien keskiarvoa ja sivujen keskeltä mitattujen paksuuksien keskiarvoa. Mittaukset tehtiin digitaalisella näytöllä varustetulla työntömitalla, jonka tarkkuus oli 0,01 mm. Väsymiskoelehdeltä tilavuus laskettiin vastaavasti sivujen ylä- ja alareunoista mitattujen sivupituuksien sekä kunkin sivulta (60 mm reunasta) kolmesta kohdasta mitattujen paksuuksien keskiarvoista. Näytelevyjen eri kohdista määritetyt tiheydet ja keskimääräiset paksuudet on esitetty kuvissa 3 ja 4.

Kunkin väsymiskoelehdeltä 12 yksittäisessä mittauskohdassa havaitun suurimman ja pienimmän paksuuden ero oli 2,5–3,0 %. Paksuuden vaihtelu keskittyi pääosin levyn leveyssuuntaan. Taulukkoon 3 on laskettu kummallekin levytyypille keskiarvo näytelehdeltä paksuuksista ja tiheyksistä. Solimaten tiheyden voidaan todeta olevan alle RHK:n vähimmäisvaatimuksen 40 kg/m^3 , joskin tiheysvaatimuksesta oltaneen luopumassa, koska se ei sinällään ole suoranaisesti levyn toiminnan kannalta kriittinen ominaisuus.



Kuva 3. Näytelevyistä saatuista koekappaleista määritetyt tiheydet (kg/m³). Pienemmät neliöt kuvaavat puristuskoekappaleita (130 mm x 130 mm) ja suuremmat neliöt väsymiskoekappaleita (400 mm x 400 mm).



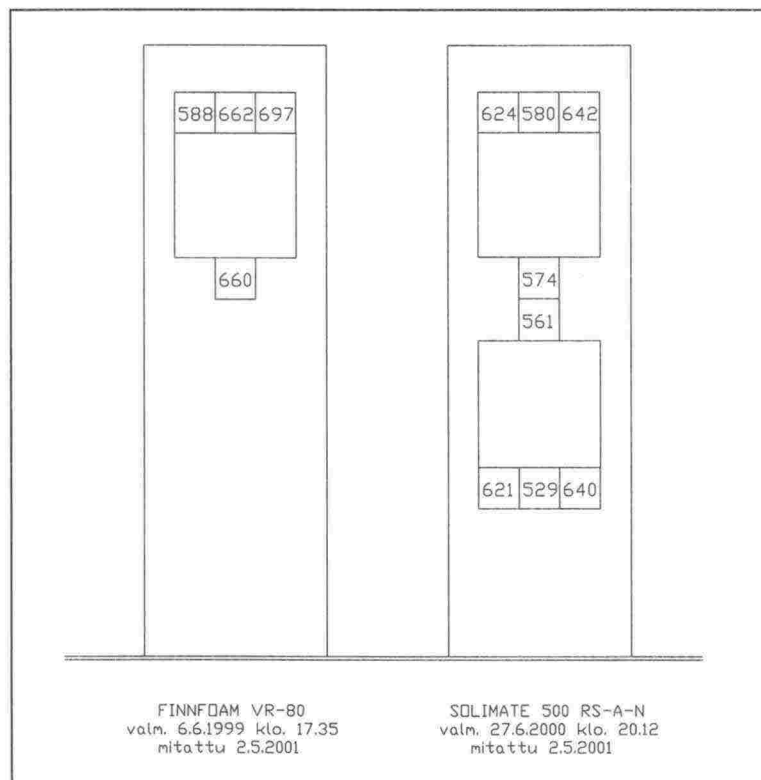
Kuva 4. Näytelevyistä saatuista koekappaleista määritetyt paksuudet (mm). Pienemmät neliöt kuvaavat puristuskoekappaleita (130 mm x 130 mm) ja suuremmat neliöt väsymiskoekappaleita (400 mm x 400 mm).

Taulukko 3. Koekappaleiden keskimääräinen paksuus ja tiheys levytyypeittäin.

| Levytyyppi | Keskimääräinen | |
|---|----------------|-----------------------------|
| | Paksuus (mm) | Tiheys (kg/m ³) |
| FINNFOAM VR-80, Valmistettu 6.6.1999 klo 17.35 | 79,84 | 41,83 |
| SOLIMATE 500 RS-A-N, Valmistettu 27.6.2000 klo 20.12 | 100.91 | 38,88 |

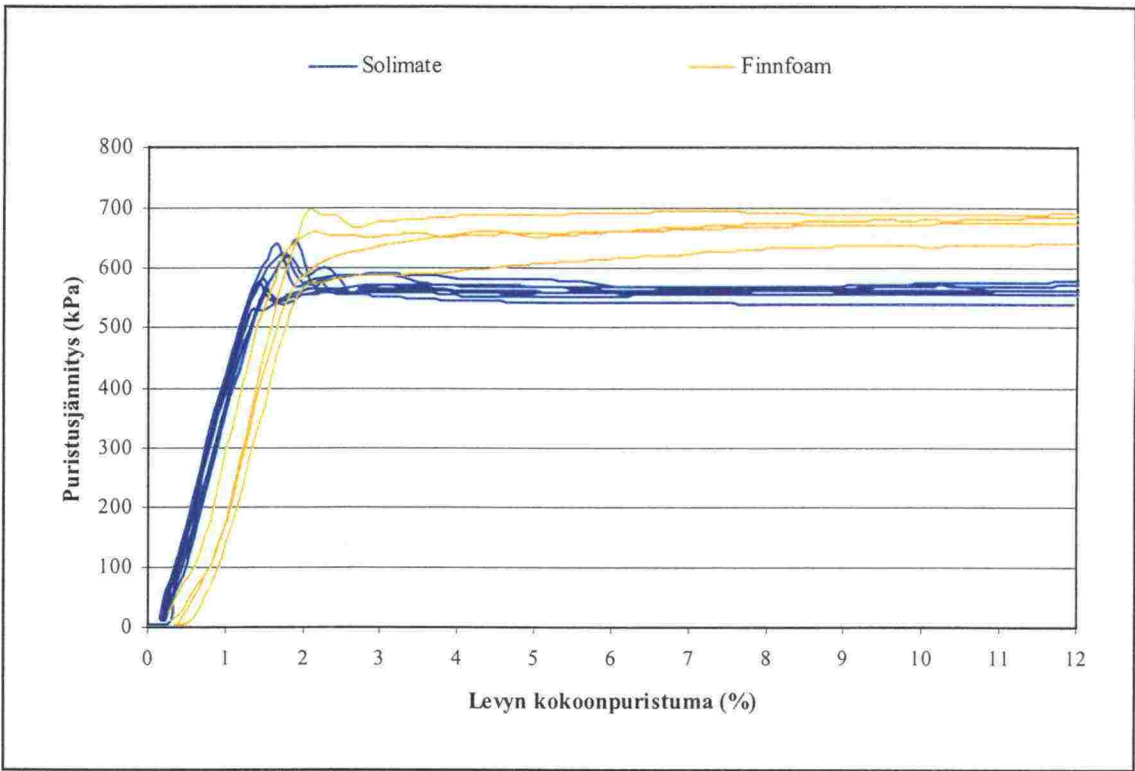
4. STAATTISET PURISTUSKOKKEET

Levytyyppien puristuslujuudet määritettiin väsymiskoekappaleiden ympäriltä vastaavalla menettelyllä, kuin aiemmassakin tutkimuksessa (Nurmikolu & Kolisoja 2001). Näytelevyjen eri kohdista määritetyt puristuslujuudet on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Näytelevyjen eri kohdista mitatut puristuslujuudet (kPa). Kuvaan on merkitty myös levyn valmistuspäivä sekä mittauspäivä.

Kuvasta nähdään, kuinka jokaisessa yksittäisessäkin mittauksessa RHK:n asettama 450 kPa:n puristuslujuusvaatimus täyttyi. Samoin on havaittavissa, kuinka levyjen puristuslujuus vaihtelee huomattavasti levyn leveyssuunnassa. Finnfoam-levyssä puristuslujuus on alhaisimmillaan toisella sivulla, kun Solimate-levyssä lujuus on heikoin levyn keskellä. Kuvassa 6 on esitetty puristuskokeiden jännitys-kokoonpuristumakäyrät.



Kuva 6. Jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeissa.

Verrattaessa mitattuja puristuslujuuksia samojen valmistuserien levyistä 9-11 kuukautta aiemmin mitattuihin voidaan Solimate-levyissä todeta huomattavaa, noin 25 % kasvua puristuslujuudessa (ks. taulukko 4). Finnfoam-levyissä vastaava kasvu oli vain noin 1 %. Tähän on luonnollisena selityksenä levyn kypsymisilmiö, jonka seurauksena levyn puristuslujuus kasvaa ajan mittaan valmistuksen jälkeisinä kuukausina (Nurmikolu & Kolisoja 2001). Tässä tapauksessa Solimate-levyn puristuslujuuden huomattava kasvu selittyy sillä, että aiemmin tehdyissä mittauksissa levyn valmistuksesta oli kulunut ainoastaan noin kuukausi, kun taas Finnfoam-levy oli aiemmin tehdyissä mittauksissa jo noin vuoden ikäistä. Taulukossa 4 esitettyjen tulosten nojalla voidaan kypsymisilmiön todeta lisäävän levyn puristuslujuutta enää merkityksettömän vähän, kun levyn valmistuksesta on kulunut yksi vuosi. Oletettavasti puristuslujuuden kasvu on suurinta heti valmistuksen jälkeisinä kuukausina.

Taulukko 4. Keskimääräiset puristuslujuudet mitattuna kesä-elokuussa 2000 ja vastaavasti toukokuussa 2001.

| Levytyyppi | Mittaus Finnfoamille 9.6.2000 Mittaus Solimatelle 1.8.2000 | Mittaukset 2.5.2001 |
|---|---|-------------------------------------|
| | Keskimääräinen puristuslujuus [kPa] | Keskimääräinen puristuslujuus [kPa] |
| FINNFOAM VR-80, Valmistettu 6.6.1999 klo 17.35 | 644 | 652 |
| SOLIMATE 500 RS-A-N, Valmistettu 27.6.2000 klo 20.12 | 477 | 596 |

Taulukosta 4 nähdään, että tarkastelluista näytelevyistä Finnfoamin puristuslujuus oli edelleen noin 10 % suurempi kuin Solimatena, vaikka ero Solimatena kypsymisen myötä olikin selvästi pienentynyt.

5. VÄSYMISKOKEET

5.1 Koejärjestelyt

XPS-levyjen väsymiskäyttäytymistä tutkittiin syklisillä pitkäkestoisilla rasituskokeilla, joissa käyttämättömiin koekappaleisiin kohdistettiin sileiden teräslevyjen välityksellä kuormituspulssseja 4 Hz taajuudella. Koesarjoja tehtiin kolme, joista kaksi Solimatelle ja yksi Finnfoamille. Yksittäisten kuormituspulssien huippujen välillä vallinneen staattisen kuormitusosuuden suuruus oli kussakin koesarjassa 10 kPa. Sen sijaan syklisen kuormitusosuuden suuruus vaihteli koesarjojen välillä ollen Solimatelle tehdyissä sarjoissa 100 kPa ja 190 kPa sekä Finnfoamille tehdyssä koesarjassa 265 kPa. Täten kokonaiskuormitus yksittäisen pulssin huipulla oli koesarjasta riippuen 110 kPa, 200 kPa ja 275 kPa. Kuormituspulssien lukumäärä valittiin sellaiseksi, että kussakin koesarjassa levyyn kohdistuneeksi kumulatiiviseksi kuormitukseksi muodostui 1.320.000 MPa, mikä vastaa 300 milj. bruttotonnin junakuormitusta olettaen, että 250 kN akselikuormasta routalevyyn kohdistuvan kuormituksen suuruus on 110 kPa. Kuormituspulssien lukumäärät muiden koetietojen ohella on esitetty taulukossa 5. Tarkemmin väsymiskoelaitteistoa ja koejärjestelyä on kuvattu TTKK:n menetelmäohjeessa (TTKK 1998).

Taulukko 5. Tehdyn kolmen pitkäkestoisen väsymiskokeen tiedot; yksittäisen kuormituspulssin suuruus (kPa), pulssien lukumäärä ja näin muodostuva kokonaiskuormitus (MPa) sekä kokeen kesto päivinä käytetyllä 4 Hz kuormitustaajuudella.

| Levytyyppi | Kuormituspulssin suuruus [kPa] | Pulssi-Määrä | Kokonaiskuormitus [MPa] | Kokeen kesto [d] |
|---|--------------------------------|--------------|-------------------------|------------------|
| SOLIMATE 500 RS-A-N, Valmistettu 27.6.2000 klo 20.12 | 110 | 12 000 000 | 1 320 000 | 36 ½ |
| SOLIMATE 500 RS-A-N, Valmistettu 27.6.2000 klo 20.12 | 200 | 6 600 000 | 1 320 000 | 20 |
| FINNFOAM VR-80, Valmistettu 6.6.1999 klo 17.35 | 275 | 4 800 000 | 1 320 000 | 14 ½ |

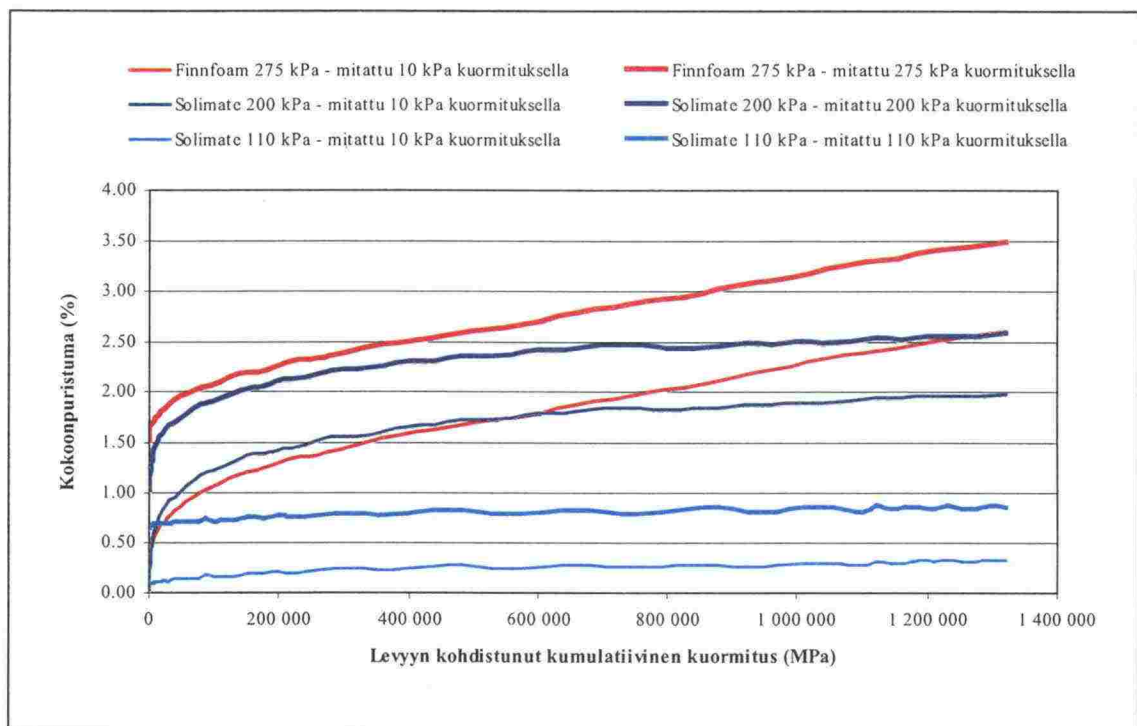
5.2 Mittaushetken kuormituksen vaikutus kokoonpuristumaan

Näytelevyihin kokeessa muodostuvan kokoonpuristuman kehitystä tarkkailtiin sekä staattisen kuormituksen (10 kPa) että syklisen huippukuormituksen (110, 200 tai 275 kPa) alaisena näytteen keskiosaan sijoitetulla siirtymäanturilla. Mittauksia tehtiin 200 pulssin välein, jolloin esimerkiksi 12.000.000 pulssin koesarjassa mittauksia kertyi 60.000. Mittaustuloksena syntyneet kokoonpuristumakäyrät levyyn kohdistuneen kumulatiivisen kuormituksen suhteen on esitetty kuvassa 7.

Normaalisti väsymiskokeessa on tähän saakka mitattu levyn kokoonpuristumaa staattisen 10 kPa kuormituksen alaisena, jolloin voitaneen puhua käytännössä palautu-

mattomasta kokoonpuristumasta, sillä pohjakuorma poistettaessa puristuman palautuminen lienee vähäistä. Syy siihen, että kokoonpuristuma mitattiin nyt myös levyn ollessa maksimikuormituksen alaisena on se, että valmisteilla olevassa XPS-tuotteita koskevassa CEN-normissa (prEN 13164 draft) esitetään toistokuormituskestävyyden testaamiseksi menetelmää SP Method 2687, jonka luonnoksen (SP Method 2687 draft) mukaan kokoonpuristuma mitataan levyn ollessa maksimikuormituksen alaisena. Sinällään mittaushetken kuormituksella ei liene merkitystä, mutta olennaista tulosten vertailtavuuden ja epäselvyyksien välttämisen nimissä on se, että vallitseva käytäntö on kaikkialla sama. Asia konkretisoituu levyn laadunvalvonnassa, sillä esimerkiksi 200 kPa kuormituspulssilla Solimatelle tehdyssä kokeessa laadunvalvontakoetta vastaavalla 400.000 MPa (2 milj. pulssia) kuormitusmäärällä kokoonpuristuma pohjakuorman (10 kPa) alla oli 1,66 % ja maksimikuorman alla 2,30 %. Näin ollen jossakin tapauksessa mittaustapa saattaa ratkaista, ylittyykö asetettu 5 % raja vai ei.

Kuvasta 7 nähdään, että kokonaiskokoonpuristuman ollessa vähäinen on kimmoisen kokoonpuristuman osuus huomattava. Jos oletetaan pohjakuorman poistamisen yhteydessä palautuva puristuma vähäiseksi, voidaan kimmoisena kokoonpuristumana pitää kuormituspulssien välissä palautuvaa kokoonpuristumaa, eli maksimikuormituksen ja pohjakuormituksen alaisena mitattujen kokoonpuristumien eroa.



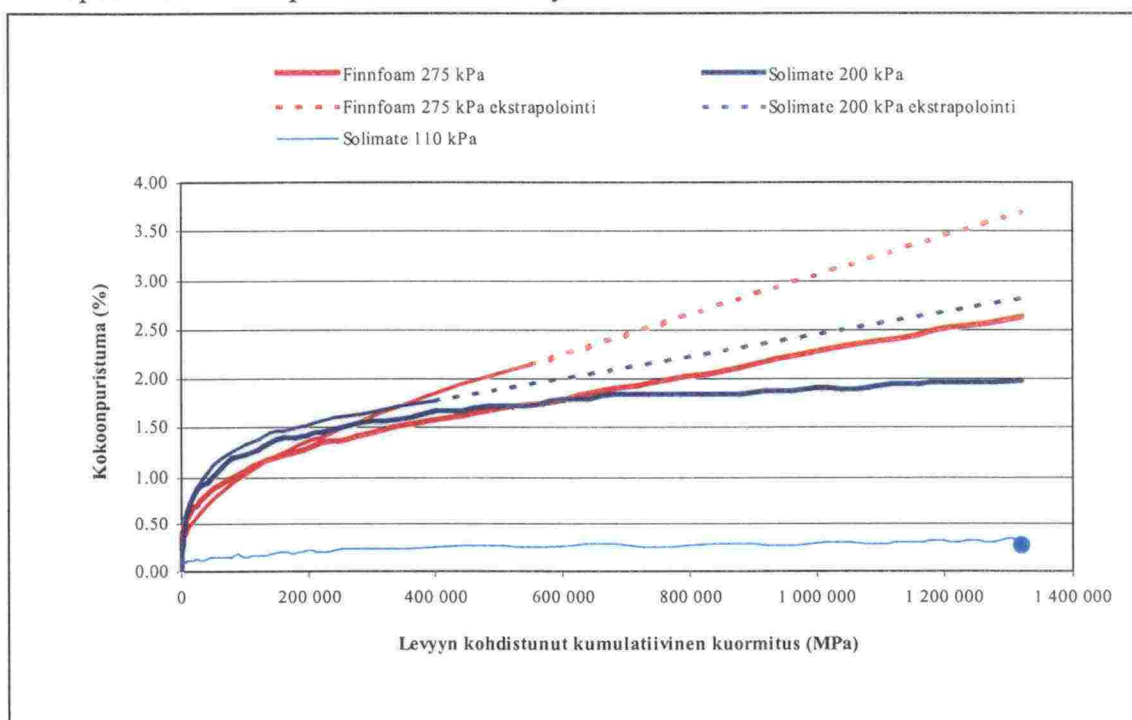
Kuva 7. Levyn kokoonpuristuma siihen kohdistuneen kumulatiivisen kuormituksen suhteen tehdyssä kolmessa koesarjassa. Kokoonpuristuma on mitattu sekä kuormituspulssin huipun (maksimikuorman) kohdalla (paksut viivat) että staattisen kuormitusosuuden (10 kPa) (ohuet viivat) alaisena.

Kokoonpuristumaa mitattaessa vallitsevan kuormitustason ohella vastaavia CEN-normiin sisällytettäviä kysymyksiä ovat staattisen ja syklisen kuormitusosuuden suuruudet sekä kuormituspulssien määrä kullakin akselikuormalla.

5.3 Ekstrapoloitu vs. täysimittaisen kokeen kokoonpuristuma

Pitkäkestoisten, 1.320.000 MPa kokonaiskuormitukseen ulotettujen väsymiskokeiden tekeminen perustui aiemmissa, kestoltaan 2.000.000 kuormituspulssin väsymiskokeissa muodostuneiden kokoonpuristumien ekstrapoloinnin oikeellisuuden varmistamiseen, kuten kappaleessa 1 on kuvattu.

Kuvassa 8 on vertailtu samoista näytelevyistä nyt mitattua ja aiemmin ekstrapoloitua kokoonpuristumaa. Kuvasta on nähtävissä, että täysimittaisessa kokeessa kokoonpuristuma on kasvanut 2.000.000 milj. kuormituspulssin jälkeen ekstrapoloinnissa oletettua hitaammin. Lisäksi on kuitenkin huomioitava, että täysimittaisissa kokeissa jo 2.000.000 milj. pulssin kohdallakin Finnfoamin kokoonpuristuma on ollut lähes 25 % pienempi ja vastaavasti Solimateen kokoonpuristuma noin 6 % pienempi kuin aiemmin mitattu. Solimateen kohdalla ero selittyy kypsymisen myötä lisääntyneellä puristuslujuudella. Sen sijaan Finnfoamin kohdalla suurelle erolle on vaikea löytää muuta selitystä, kuin levyn epätasalaatuisuus, joka ilmeni staattisissa puristuskokeissa lujuuden muuttumisena levyn leveyssuunnassa (ks kappale 4). Koesarjoissa mitatut ja ekstrapoloidut kokoonpuristumat on esitetty taulukossa 6.



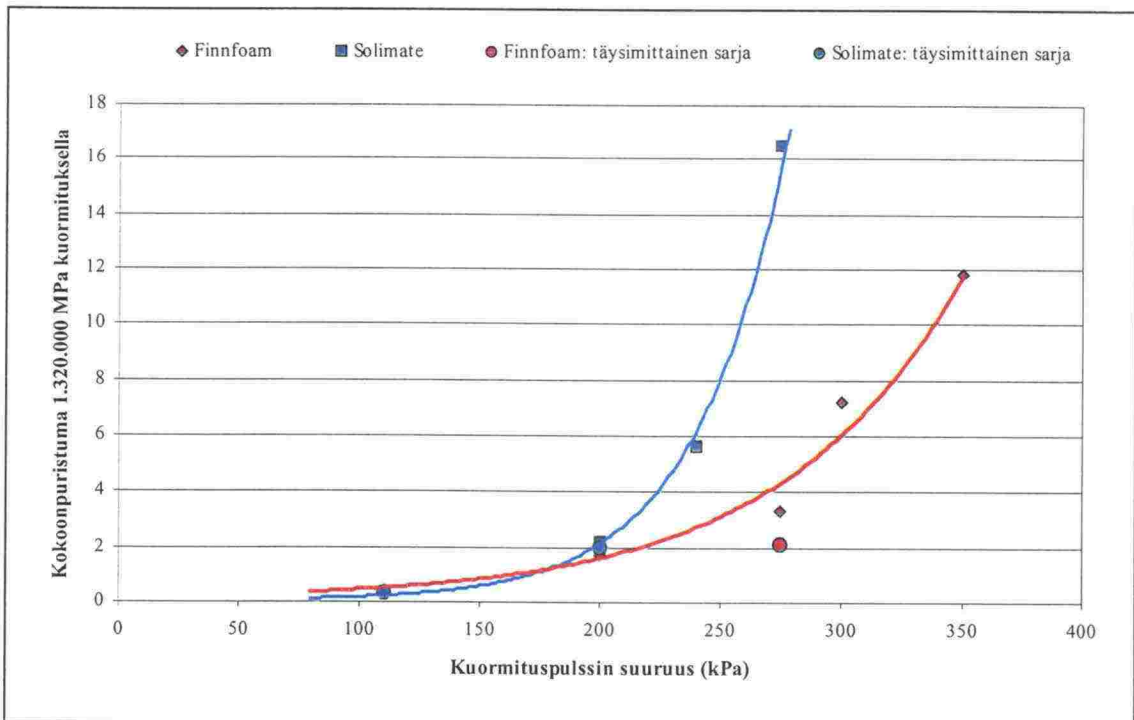
Kuva 8. Täysimittaisissa, 1.320.000 MPa ulotetuissa koesarjoissa muodostuneiden koesarjojen vertailu aiemmassa tutkimuksessa 2 milj. kuormituspulssin perusteella 1.320.000 MPa:iin ekstrapoloituihin kokoonpuristumiin. Sininen pallo kuvaa aiemman tutkimuksen perusteella odotusarvoa Solimate-levyn kokoonpuristumalle 110 kPa kuormituksella.

Täysimittaisten koesarjojen kokoonpuristuma – kumulatiivinen kuormitus – käyrien muodon perusteella tarkennettiin aiemmin 2.000.000 kuormituspulssiin ulotetuista koesarjoista 1.320.00 MPa kokonaiskuormitukseen tehtyä ekstrapolointia. Kuvassa 9 on esitetty täysimittaisten koesarjojen tulokset sijoitettuna tarkennetun ekstrapoloinnin perusteella laadittuun kuvaajaan, jossa 1.320.000 MPa kokonaiskuormituksella

muodostuvaksi oletettua kokoonpuristumaa tarkastellaan levytyypeittäin kuormituspulssin suuruuden suhteen.

Taulukko 6. Koesarjoista aiemman tutkimuksen yhteydessä (v. 2000) ja nyt (v. 2001) mitatut kokoonpuristumat 2.000.000 kuormituspulssin jälkeen sekä mitatut ja ekstrapoloidut 1.320.000 MPa kokonaiskuormitusta vastaavat kokoonpuristumat. 2.000.000 kuormituspulssia vastaa 200 kPa kuormitustasolla 400.000 MPa kuormitusta ja 275 kPa kuormitustasolla 550.000 MPa kuormitusta.

| Levy- tyyppi | Kuormitus- pulssin suuruus | Kokoonpuristuma (%) | | | |
|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| | | 2.000.000 kuormituspulssin jälkeen | | 1.320.000 MPa kuormituksella | |
| | | Mitattu v. 2000 | Mitattu v. 2001 | Ekstrapoloitu | Mitattu v. 2001 |
| Solimate | 200 kPa | 1,76 | 1,66 | 2,8 | 1,97 |
| Finnfoam | 275 kPa | 2,14 | 1,73 | 3,7 | 2,61 |



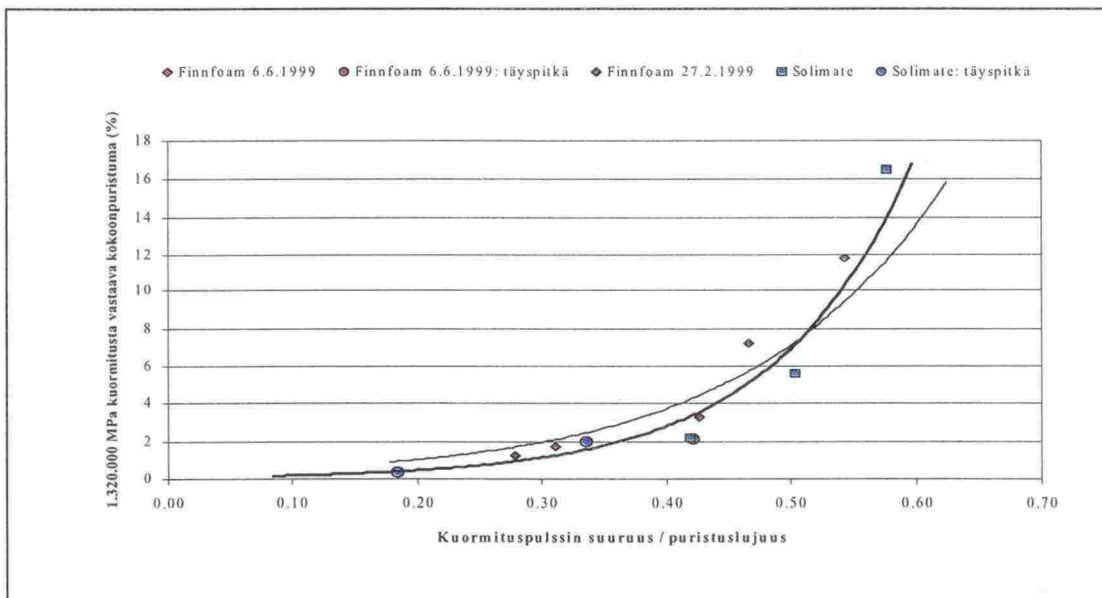
Kuva 9. 2.000.000 kuormituspulssin perusteella 1.320.000 MPa kuormitukseen ekstrapoloitujen sekä täysimittaisissa koesarjoissa muodostuneiden kokoonpuristumien riippuvuus kuormituspulssin suuruudesta **täysimittaisien koesarjojen perusteella tehdyn ekstrapoloinnin tarkennuksen jälkeen**. Täysimittaisissa koesarjoissa muodostuneet kokoonpuristumat on merkitty pallolla. Ekspontiaalinen trendikäyrä on piirretty ainoastaan ekstrapoloitujen kokoonpuristumien perusteella.

Kuvasta 9 nähdään, että Solimate-levylle tehdyissä pitkäkestoisissa koesarjoissa muodostuneet kokoonpuristumat vastaavat hyvin laadittua erinomaisen korrelaation omaavaa eksponentiaalista trendikäyrrä. Sen sijaan Finnfoam-levylle 275 kPa kuormitustasolla tehdyssä pitkässä kokeessa muodostunut kokoonpuristuma oli selvästi trendikäyrän perusteella ennakoitavaa pienempi. On tosin huomattava, että Finnfoam-levyille ekstrapoloitujen kokoonpuristumien eksponentiaalinen korrelaatio kuormitus-

tasoon on selvästi huonompi kuin Solimate-levyllä. Lisäksi kuvasta havaitaan, että Finnfoam-levylle jo aiemmin 275 kPa kuormitustasolla tehdyssä kokeessa muodostunut kokoonpuristuma oli eksponentiaalisen trendikäyrän mukaista pienempi. Edellä esitettyjen havaintojen perusteella voidaan todeta Finnfoam-levyn toistokuormituskestävyyden olevan Solimate-levyä heikommin mallinnettavissa tarkastellulla kokoonpuristuma – kuormituspulssin suuruus – menettelyllä. Syynä tähän saattaa osaltaan olla myös se, että osa Finnfoam-levyille tehdyistä koesarjoista on tehty käyttötilassa levyyn kohdistuvaa kuormitusta huomattavasti suuremmilla kuormitustasoilla, jolloin satunnaistekijöiden merkitys tuloksiin mitä ilmeisimmin korostuu. Mahdollista on myös levyn leveyssuuntaisen lujuusvaihtelun seurauksena kokoonpuristuman epätasainen jakautuminen näytekappaleessa, mikä niinkään lisää satunnaisvaihtelua ja korostuu isommilla kuormitustasoilla.

5.4 Akselikuorman korottamisesta routalevyyn aiheutuvan vauriolisäyksen arviointi

Solimate-levylle tehtyjen pitkäkestoisten koesarjojen tuloksia ei sinällään voida verrata samasta levystä aiemmin tehtyihin koesarjoihin, koska Solimaten puristuslujuus kypsymisen myötä oli merkittävästi kasvanut aiempien väsymiskokeiden aikaisesta arvosta. Niinpä seuraavassa väsymiskokeessa muodostuneen kokoonpuristuman tarkasteluun liitetään levyn puristuslujuus. Kuvassa 10 on esitetty tarkennettujen ekstrapolointien perusteella määritettyjen sekä pitkistä koesarjoista 1.320.000 MPa kuormituksen jälkeen mitattujen kokoonpuristumien riippuvuus kuormituspulssin suuruuden ja puristuslujuuden suhteesta (vrt. kuva 2).



Kuva 10. 300 miljoonan bruttotonnin junakuormitusta routalevyn tasolla vastaavaa kuormitukseen (1.320.000 MPa) lyhemmistä koesarjoista ekstrapoloidut sekä täysimittaisissa koesarjoissa muodostuneet kokoonpuristumat kuormituspulssin suuruuden ja levyn puristuslujuuden suhteen funktiona tutkituilla Finnfoam- ja Solimate-levyillä. Täysimittaisien (1.320.000 MPa:iin ulotettujen) koesarjojen havaintoja on merkitty pallolla. Paksu eksponentiaalinen trendikäyrä on piirretty korjattujen ekstrapolointien sekä täysimittaisien koesarjojen perusteella. Kuvaan on vertailun vuoksi piirretty (ohut trendikäyrä) myös aiempien ekstrapolointien mukainen, kuvassa 2 esitetty, trendikäyrä.

Kuvasta 10 havaitaan, että levyn vaurioitumista kuvaava kokoonpuristuma kasvaa merkittävästi kuormitustason ylittäessä noin $\frac{1}{3}$ levyn puristuslujuudesta, jota RHK:n routalevyille asettaman puristuslujuusvaatimuksen (450 kPa) alarajalla vastaa 150 kPa.

Olettamalla kuvan 10 kokoonpuristuman kuvaavan levyn vaurioitumista voidaan mahdollisesta akselikuorman korottamisesta routalevyyn aiheutuvaa vauriolisäystä arvioida. Taulukkoon 7 on laskettu puristuslujuudeltaan 450 kPa levyyn akselikuorman korottamisesta kuvan 10 perusteella aiheutuva vauriolisäys. Laskennassa on oletettu lisäksi 250 kN akselikuormasta routalevyyn kohdistuvaksi kuormitukseksi 110 kPa, vastaavasti 225 kN:sta 99 kPa ja 300 kN:sta 132 kPa (Nurmikolu & Kolisoja 2001). Taulukossa 7 on laskettu vauriolisäys myös käyttämällä varmuuskerrointa levyyn kohdistuvassa kuormituksessa. Taulukossa 7 esitetyt vauriolisäykset ovat pienemmän akselikuorman korotuksen (225 kN → 250 kN) osalta hieman suuremmat kuin aiemman tutkimuksen pohjalta esitettiin (vrt. taulukko 1). Tämä johtuu siitä, että eksponentiaalisen trendikäyrän muoto kuvassa 10 tarkentui uusissa tarkasteluissa aiemmin arvioitua jyrkemmin kasvavaksi, kun pienemmillä kuormitustasoilla tehtyjen kokeiden ekstrapoloituja kokoonpuristumia tarkennettiin suhteessa enemmän alaspäin. Ero aiemmin tehdyn ja nyt tarkennetun vaurioarvioinnin välillä on kuitenkin melko vähäinen.

Taulukko 7. Akselikuorman korottamisesta aiheutuva puristuslujuudeltaan 450 kPa olevien XPS-routalevyjen vaurioitumisen lisääntyminen kuvan 10 mukaan.

| Akselikuorman korotus | Korotusta vastaava routalevyn vauriolisäys | |
|-----------------------|--|-------|
| | Varmuuskerroin levyyn kohdistuvalle kuormitustasolle | |
| | 1,0 | 1,5 |
| 225 kN → 250 kN | 27 % | 43 % |
| 225 kN → 300 kN | 83 % | 136 % |

6. YHTEENVETO

Kunkin väsymiskoekappaleen 12 yksittäisessä mittauskohdassa havaitun suurimman ja pienimmän paksuuden ero oli 2,5–3,0 %. Paksuuden vaihtelu keskittyi pääosin levyn poikkileikkauksen suuntaan.

Tutkituista XPS-routalevyistä Solimaten staattinen puristuslujuus oli kasvanut noin 25 % noin yhdeksän kuukautta aiemmin mitatusta. Tämä vahvistaa käsitystä levyn valmistuksen jälkeisinä kuukausina tapahtuvasta levyn kypsymisestä, puristuslujuuden kasvusta, sillä Solimate-levy oli aiemmissa mittauksissa vain noin yhden kuukauden ikäistä. Finnfoam-levystä mitattujen puristuslujuuksien nojalla oli todettavissa kypsymisilmiön vaikuttavan merkityksettömän vähän yli vuoden ikäiseen levyyn.

Puristuslujuus vaihteli levyn leveyssuunnassa. Finnfoam-levyissä puristuslujuus oli suurimmillaan toisella reunalla heikentyen melko tasaisesti toiselle reunalla. Solimate-levyissä puristuslujuus oli alhaisimmillaan levyn keskellä.

Määritettäessä valmisteilla olevaan XPS-tuotteita koskevaan CEN-normiin koe-menetelmää toistokuormituskestävyydelle tulisi samalla ottaa kantaa kuormitustasoon, jonka alaisena kokoonpuristuma mitataan. Vastaavia normiin sisällytettäviä kysymyksiä ovat staattisen ja syklisen kuormitusosuuden suuruudet sekä kuormituspulssien määrä kussakin akselikuormaluokassa.

Routalevyihin kohdistettujen, junakuormituksena mitattuna 300 milj. bruttotonnia vastaavien koesarjojen tuloksista havaittiin, että aiemmin 2.000.000 milj. kuormituspulssin nojalla tehdyissä ekstrapoloinneissa kokoonpuristuman kasvu oletettiin liian suureksi. Tehdyt ekstrapoloinnit korjattiin pitkien koesarjojen perusteella. Solimate levyyn 300 milj. bruttotonnin junakuormitusta vastaavan kuormituksen jälkeen muodostuneeksi ekstrapoloidulle kokoonpuristumalle havaittiin erinomainen eksponentiaalinen korrelaatio kuormituspulssin suuruuteen. Finnfoam-levyllä korrelaatio ei ollut yhtä selvä. Levyn vaurioitumista kuvaava kokoonpuristuma havaittiin kasvavan merkittävästi kuormitustason ylittäessä noin $\frac{1}{3}$ levyn puristuslujuudesta.

Tarkasteltujen Finnfoam- ja Solimate-levyjen väsymiskäyttäytymisen perusteella tarkennettiin arvioita mahdollisen akselikuorman korottamisen seurauksena aiheutuvasta routalevyn vauriolisäyksestä. Vauriolisäykset tarkentuivat keskimäärin hieman suuremmiksi aiemmin arvioituihin verrattuna, mikä johtui siitä, että aiemmin pienillä kuormitustasoilla tehtyjen koesarjojen kokoonpuristumien ekstrapoloinnit tarkentuivat alaspäin suhteessa eniten. Erot olivat kuitenkin melko vähäiset. Puristuslujuudeltaan 450 kPa levyn vaurioitumisen arvioidaan lisääntyvän 27 % siirryttäessä 225 kN:sta 250 kN:iin ja 83 % siirryttäessä 225 kN:sta 300 kN:iin. Kun levyyn kohdistuvassa kuormitustasossa otetaan huomioon varmuuskertoimena 1,5, saadaan vastaavina vauriolisäyksinä 43 % siirryttäessä 225 kN:sta 250 kN:iin ja 136 % siirryttäessä 225 kN:sta 300 kN:iin.

LÄHTEET

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. (2001). XPS-Routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2001. Helsinki, Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. 97 s., 3 liitettä.

prEN 13164 (2000). DRAFT: Thermal insulation products for road, traffic areas, railways and embankment filling – Factory made products of extruded polystyrene foam (XPS) – Specification. European Committee for Standardization. 38 s.

SP Method 2687 (2000). DRAFT: Test method, Building Technology. Resistance to cyclic compressive loading with square-wave load. Issued 28.12.2000. 8 s.

Tampereen teknillinen korkeakoulu, Geotekniikan laboratorio (1998). Routaeristelevyn väsytykskoe. Testausohje no: GEOT/16.

| | |
|---------|--|
| 1/1997 | Railway Industry Structures and Capital Investment Financing |
| 2/1997 | Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset |
| 3/1997 | Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI) |
| 4/1997 | Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla |
| 5/1997 | Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020 |
| 1/1998 | Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutusselvitys |
| 2/1998 | Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96) |
| 3/1998 | Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät |
| 4/1998 | Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99 |
| 5/1998 | Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi |
| 6/1998 | Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratakankkeissa |
| 1/1999 | Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 2/1999 | Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset |
| 3/1999 | Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 4/1999 | Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 5/1999 | Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa |
| 6/1999 | Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 7/1999 | Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-Haaparanta akselipainojen korottamista varten |
| 8/1999 | Ratarumpujen maastoselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 1/2000 | Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti. Kehittämismavaihtoehtojen vaikutustarkastelut |
| 2/2000 | Bantrumor, 250 kN och 300 kN axellaster |
| 3/2000 | Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus |
| 4/2000 | Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään |
| 5/2000 | Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 6/2000 | Väliraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen ratateknisistä tutkimuksista |
| 7/2000 | Intermediate Report, 250 kN and 300 kN axle loads |
| 8/2000 | Ratatekniset määräykset ja ohjeet -julkaisun käytettävyydestutkimus |
| 9/2000 | Ratakapasiteetin perusteet |
| 10/2000 | Instrumentation and Modelling of Track Structure, 250 kN and 300 axle loads |
| 11/2000 | Rautatieonnettomuuksien sisäiset ja ulkoiset kustannukset |
| 12/2000 | Internal and External Costs of Railway Accidents |
| 1/2001 | Rataverkko 2020 -suunnitelma |
| 2/2001 | XPS-routaeristelevyt ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 3/2001 | Raidetutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 4/2001 | Radan kunnossapitokustannusten kirjallisuustutkimus, |
| 5/2001 | Loppuraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen teknisistä tutkimuksista |
| 6/2001 | Final Report 250 kN and 300 kN axle loads |
| 7/2001 | Rautateiden maanvaraiset pylväasperustukset. Koekuormitusraportti |
| 8/2001 | Ratarumpututkimus. Instrumentointi ja mittaukset |
| 9/2001 | Vakioaikataulu junaliikenteen ja rautatieinfrastruktuurin kehittämisessä |
| 10/2001 | Työnaikaisten ratakaivantojen tukeminen |
| 11/2001 | Pääkaupunkiseudun rautateiden meluntorjuntaohjelma vuosille 2001 - 2020 |
| 12/2001 | Rautatietasoristeysten turvaaminen |
| 13/2001 | Rautatieliikenteen onnettomuusriskit ja turvaamistoimenpiteet |
| 14/2001 | Valtakunnallinen rautatieliikenteen melun suuruusluokkaselvitys |

RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

KUNNOSSAPITOYKSIKKÖ

Lisätietoja: Markku Nummelin, puh. (09) 5840 5180, sähköposti: markku.nummelin@rhk.fi
Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-064-x
ISSN 1455-2604